INVESTIGACION y CIENCIA

¿ES UN FRAUDE LA TEORIA DE LA COMPLEJIDAD?

HUELLAS DE DINOSAURIOS DE LA RIOJA

AGENTES DEL RETRASO INFANTIL



SELECCION DEL POLEN ENTRE LAS FLORES

AGOSTO 1995
700 PTAS.

INVESTIGACION y CIENCIA
Agosto de 1995 Número 227

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *Infección por gusanos intestinales*; Luis Bou: *La aritmética de la ayuda mutua, De la complejidad a la perplejidad, Taller y laboratorio* y *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Descifrando un plano romano*; Juan Pedro Campos: *Núcleos con halo*; Joandomènec Ros: *Reconocimiento del parentesco*; José M. García de la Mora: *Cartas*; Oriol Pascual: *Apuntes*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Campos y Oriol Pascual

Ciencia y empresa:

Luis Bou, Juan Pedro Campos y Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Rosemary Volpe

Página	Fuente
6-7	Dibujo de J. Salanguera
8	Silvia Nuere
9-12	José-Vicente Santafé y M. Lourdes Casanovas
15-17	Chip Simons
20	Ian Worpole
21	Chip Simons
22-23	David Scharf
24	David I. Pritchard (fotografía); Ian Worpole (mapa) y Lisa Burnett (tabla)
25	Archivo Rockefeller
26	Jared Schneidman Design
27	David Scharf
28	Wayne M. Meyers, Instituto de las Fuerzas Armadas de Patología (*fotografía*); JSD (*dibujo central*) y Lisa Burnett (*tabla*)
30	Mafo Plata
42-43	Runk/Schenberger, Grant Heilman Photography, Inc. (*arriba*); Lisa Burnett (*abajo*)
44	Lisa Burnett
45	Joy Spur, Bruce Coleman Inc.
46-47	Martin A. Nowak; Lisa Burnett (gráfica)
50-51	Tomo Narashima
52-53	Tomo Narashima (*fondo*); Ian Worpole (*arriba*); Lothar Haselberger (*abajo*)
54	Jeff Fadellin
55	Lothar Haselberger
57-62	Michael Goodman
64-65	Roberto Osti
66	Richard K. Grosberg
67	Laurie Grace
68	Larry Ditto, Bruce Coleman Inc.
69	Ron Garrison, Sociedad Zoológica de San Diego
74-75	Michael Crawford
76	Spektrum der Wissenschaft
84	Alun L. Lloyd
87-89	Pour la Science



La ilustración de la portada corresponde a un albarraz de montaña *(Delphinium nelsonii)*, que posee un sistema rudimentario de reconocimiento de parentesco. Estas flores silvestres distinguen el polen de plantas emparentadas, que tienden a vivir cerca unas de otras, del polen de flores no emparentadas. La selección natural ha favorecido a muchas otras plantas y animales que pueden identificar a sus parientes (*véase* "Reconocimiento del parentesco", de David W. Pfennig y Paul W. Sherman, en este mismo número). La pintura es de Rosemary Volpe.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Filmación: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

La vida en sus comienzos

El artículo de Leslie E. Orgel "Origen de la vida sobre la Tierra" [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994] hace referencia, como la mayoría de los manuales que corren sobre química prebiótica, al experimento de Stanley Miller conocido por la sigla AHAM (agua, hidrógeno, amoniaco y metano). Lo mismo que otras descripciones de experimentos más o menos similares al de Miller, Orgel no menciona que algunos aminoácidos son componentes menores de los alquitranes, según A. G. Cairns-Smith y no pueden servir en absoluto como bloques de construcción de una proteína. ¿Por qué centenares de libros de texto y de artículos pasan por alto este error, grieta que se abre en el edificio levantado sobre la obra de Miller?

C. W. STAMMERS
Bath, England

Escribe Orgel que "hasta mediados del siglo XVII, el origen de la vida estaba resuelto. Dios había creado al hombre". Yo añadiría que aún son muchos los que siguen creyéndolo. La probabilidad de que la vida surgiera casualmente y de que luego se fuera formando al azar la multitud de productos bioquímicos necesarios para sustentarla es minúscula. En su obra *Genesis and the Big Bang*, Gerald L. Schroeder afirma que, para que se crease por casualidad una sola proteína, tendrían que haberse efectuado 10^{110} ensayos por segundo desde el comienzo del tiempo. Desde la gran explosión (desde el "big bang") hasta nuestros días han transcurrido menos de 10^{18} segundos.

JOSEPH M. MILLER
Timonium, Md.

Orgel replica:

La arriba citada crítica de Cairns-Smith al experimento de Stanley Miller expresa una opinión que la mayoría de los científicos hallarían demasiado extremada. Estoy de acuerdo en que los libros de texto simplifican excesivamente. Espero que en el futuro dejen bien claro que los impactos cometarios, la reducción del dióxido de carbono y otros mecanismos son también posibles fuentes de materia orgánica sobre la Tierra primitiva.

Piensen lo que piensen los lectores de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA sobre la creación de la humanidad, dudo que muchos crean en la generación espontánea de las ranas. ¿Cree en ella Mr. Miller? Si no cree, por qué no ha citado bien toda mi frase ("... mientras que insectos, las ranas y demás criaturas pequeñas surgirían por generación espontánea en el fango o en materia en descomposición.")? Respecto a su segunda objeción, muy pocos científicos piensan que las proteínas funcionales (o las ranas) pudiesen surgir por azar en una sola etapa. Los seres complejos y adaptados resultan, por selección natural, de otros más simples. La biología molecular ha demostrado inequívocamente que las ribozimas, comparables en muchos aspectos a las enzimas proteínicas, pueden obtenerse a voluntad en el laboratorio, a partir de mezclas de ARN totalmente aleatorias, con sólo dejar que actúe la selección natural.

¿Hay que desechar la teoría de la gran explosión?

En "Evolución del universo", por P. James, E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner y Richard G. Kron [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994], afirman los autores que no existen objeciones de peso contra la teoría de la gran explosión. Sin embargo, en líneas generales puede decirse que sí que hay informes que arremeten hoy contra las bases de la teoría. La presunta expansión uniforme del universo visible no es tan uniforme: parece ser que una gran parte del universo local se está moviendo masivamente en una dirección distinta de la que lleva el resto del cosmos. La distribución de las galaxias no resulta tan homogénea en un mapa tridimensional. Además, ¿no se basa la teoría de la gran explosión en la hipótesis *ad hoc* de la materia oscura? Me deja muy escéptico cualquier grupo de científicos que diga que su interpretación de los hechos es indiscutible.

BILL BUTLER
Palm Desert, California

Tropiezo con un problema al leer el artículo "Evolución del universo". La luz tarda un poco menos de siete horas en llegar desde el Sol hasta el planeta más exterior, Plutón. Según la teoría especial de la relatividad de Einstein, nada puede viajar a velocidad mayor que la de la luz. Sin embargo, en el artículo se afirma que "toda la materia que podemos medir llenaba una región del tamaño del sistema solar... una vez el cosmos hubo crecido mil veces más... Todo esto ocurrió en el primer minuto de la expansión". Qué fue lo que permitió a la materia y a la energía viajar miles de veces más deprisa que la luz?

JACK A. WILLIAMSON
Penetanguishene, Ontario

Peebles, Schramm, Turner y Kron replican:

Los recientes informes de desafíos a la teoría de la gran explosión a lo que realmente se refieren es a intentos de entender la historia del cosmos dentro de esta teoría. Por ejemplo, las observaciones de que las galaxias forman cúmulos y se mueven juntas a escalas muy grandes plantean problemas para ciertas teorías sobre la formación de las galaxias, pero son buenas noticias para otras. Algunas de estas teorías postulan una exótica materia oscura, pero la realidad de tal materia está sujeta a comprobación en experimentos de laboratorio. Que en la infancia del universo el espacio se expandiera a una velocidad mayor que la de la luz no viola la relatividad especial, pues ésta sólo dice que *la información* no puede transmitirse más deprisa que la luz.

La actual avalancha de datos observacionales y experimentales hace que nuestra época sea apasionante para la cosmología, pero no hay duda de que, lo mismo que en el pasado, hemos de refinar e incluso revisar nuestras teorías a medida que se va contando con más datos.

Hace 150 años

Historia de Scientific American

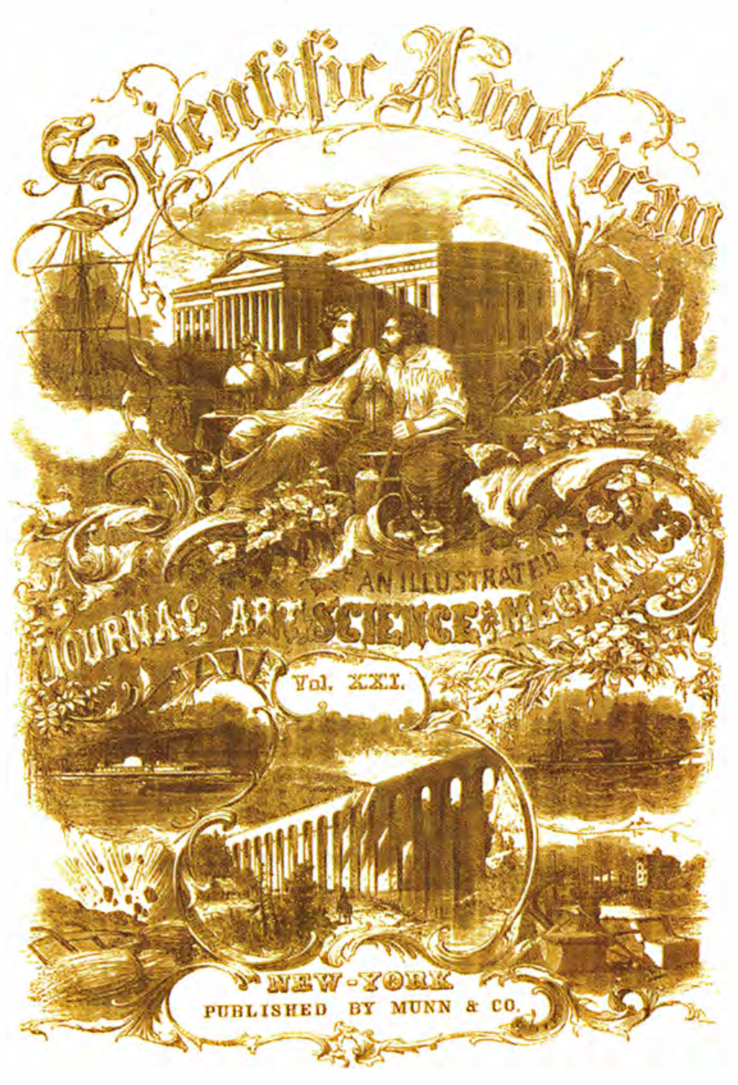
El 28 de agosto de 1845 se iniciaba en Nueva York la publicación de un periódico de cuatro páginas, en la segunda de las cuales el editor insertaba una carta que comenzaba:

"Al público americano
Benefactores y amigos:
Al tener el placer de reaparecer ante vosotros, bajo nuevo título y con nuevo aspecto, se esperará probablemente que hagamos algunas observaciones generales, especialmente sobre nuestros motivos, intenciones y planes. Desde que dejó de publicarse el "American Mechanic" (y tras la desaparición previa del "Elevator", de Cincinnati, del "American Protector", de Hartford, y del "N.Y. State Mechanic", de Albany), industriosos emprendedores y otras personas nos han pedido muchas veces que pensásemos en la publicación de un nuevo periódico científico, cuya finalidad fuese el progreso y la ampliación del conocimiento de las artes y los oficios en general, con especial dedicación empero a las diversas artes nuevas, curiosas y útiles, que tan recientemente se han descubierto y dado a conocer... Confiando totalmente en vuestra benevolencia y generoso apoyo —aunque sin dudar ni por un instante de que siempre consideraréis en este asunto tanto vuestros intereses como los nuestros—, encomendamos el SCIENTIFIC AMERICAN a vuestro favor y patrocinio."

El autor de la carta y editor de este nuevo periódico era Rufus K. Porter, nacido en West Boxford, Massachusetts, en 1792. Toda la educación superior de Porter se redujo a los seis meses que, cuando tenía 12 años, estuvo en la Fryeburg Academy, de Maine. En la biografía escrita por Jean Lipman (*Rufus Porter, Yankee Pioneer*; Clarkson L. Potter, Nueva York, 1968) se nos informa de que "a continuación y sucesivamente fue pintor de brocha gorda..., tamborilero... Durante un breve período de 1814 perteneció a la Infantería Ligera de Portland. Luego fue maestro, construyó molinos de viento, ideó y registró un libro de música... Diseñó un automóvil, un tren elevado y un aeroplano de pasajeros". Hombre dotado de carácter e imaginación, Porter fue un verdadero "renacentista" del siglo XIX.

No mucho más de un año después del inicio de la publicación, Porter vendió SCIENTIFIC AMERICAN a Orson Desaix Munn, empresario de 22 años, y a Alfred Ely Beach, joven de 19 años cuya experiencia periodística procedía del "The New York Sun", periódico cuyo propietario era su padre. Porter realizó la operación porque necesitaba dinero para construir un modelo operativo de un dirigible de 60 metros de largo, hecho con varillas de madera y recubierto de papel, relleno con hidrógeno, movido por vapor y carbón y propulsado por hélice. Su intención última era que el globo definitivo transportase hasta California a los buscadores de oro. El prototipo hizo entrar a Porter en la historia como la primera persona que realizase una demostración de una máquina voladora autopropulsada.

Munn & Company conservaron la propiedad de SCIENTIFIC AMERICAN durante todo un siglo. La publicación se hizo eco de los mayores descubrimientos de la revolución industrial y sus oficinas (situadas entonces en la parte baja de Broadway, en Nueva York) se convirtieron en lugar de reunión habitual de los más destacados inventores de la época: Thomas Edison llevó allí para su examen el prototipo del fonógrafo; Samuel Morse, padre del telégrafo, Elias Howe, inventor de la máquina de coser, y el capitán John Ericsson, arquitecto del acorazado Monitor, se encontraban entre los contertulios habituales. Los pioneros que se dirigían al Oeste porta-



Cabecera de la revista en su primera época

ban las preciadas colecciones de SCIENTIFIC AMERICAN en sus carretas entoldadas. Wilbur y Orville Wright, Glenn Curtiss y otros adelantados de la aviación leían SCIENTIFIC AMERICAN, escribían colaboraciones y concursaban a los premios y distinciones que la revista convocaba para fomentar la invención.

El periplo de SCIENTIFIC AMERICAN fue intenso, atrevido y controvertido, alcanzando, de manera lenta pero inevitable, una gran repercusión. Cuando un político neoyorquino no cumplió su palabra de hacer pruebas de las nuevas técnicas de transporte subterráneo, el entonces editor de SCIENTIFIC AMERICAN hizo perforar en secreto un túnel entre dos manzanas de la ciudad y dio a conocer los resultados favorables conseguidos. A comienzos del presente siglo, SCIENTIFIC AMERICAN criticó duramente al gobierno de los Estados Unidos por no construir una gran flota de navíos de guerra rápidos, cuando toda Europa se estaba movilizando, pero celebró luego ampliamente las características y la botadura de cada navío construido. En determinado número se incluyó un inserto doblado que, al extenderlo, representaba a tamaño natural y elogiaba sin reservas las técnicas utilizadas en la bala de cañón Dreadnought.

Cuando el empresario industrial Armand Hammer visitó la entonces recién creada Unión Soviética, a principios de los años veinte, se entrevistó con Lenin, como recuerda en su autobiografía (publicada por G. B. Putnam's Sons, Nueva York, 1987). Según nos cuenta, "Lenin tomó un ejemplar de *Scientific American* y me dijo: 'Mire, esto es lo que hace su gente y esto es lo que significa la palabra progreso: edificios, inventos, máquinas, ayudas mecánicas para los brazos humanos. La Rusia actual es como era vuestro país en la época de los pioneros. Necesitamos los conocimientos y las actitudes que hicieron de América lo que es hoy en día.'"

Hacia 1948, SCIENTIFIC AMERICAN languidecía, como muchas otras publicaciones periódicas, a consecuencia del racionamiento posbélico y por la competencia de los nuevos medios electrónicos, radio y televisión (palabra esta última que, por cierto, se rumorea que tuvo en SCIENTIFIC AMERICAN su primera aparición escrita). Gerard Piel y Dennis Flanagan, periodistas de LIFE, junto con Donald Miller y algunos otros inversores, se convirtieron en los terceros propietarios de SCIENTIFIC AMERICAN, creando la sociedad Scientific American, Inc. Introdujeron cambios en el contenido de la revista, haciendo que la mayor parte de los artículos fuese escrita por quienes habían realizado la investigación correspondiente. Conforme a su experiencia en LIFE (que por entonces era la primera revista ilustrada del mundo), incluyeron gran cantidad de ilustración, tanto fotográfica como dibujada. Y establecieron su orientación fundamental, que permanece inalterada hasta el presente, a saber, que el sentido de la ciencia es el progreso y bienestar de la humanidad.



Oficinas de la revista en Nueva York. Año 1859

El así rejuvenecido SCIENTIFIC AMERICAN incrementó pronto su número de lectores y fue muy apreciado. Pero no había perdido su compromiso con la libertad de prensa ni su oposición a la censura. No mucho después de la adquisición de la revista, Piel tuvo que contemplar muy a su pesar la incineración de varios miles de ejemplares del número de abril de 1950, efectuada por agentes de la Comisión de Energía Atómica estadounidense. La gran difusión que tuvo el hecho consiguió todo lo que la Comisión, al parecer, temía, y fueron de dominio público los peligros del armamento nuclear y la necesidad de su control internacional. (Gerard Piel ha contado toda la historia en su libro *Science in the Cause of Man*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1962.)

Se dedicó mucho esfuerzo a que la forma no fuese inferior al fondo, y se logró. El poeta Robert Frost dijo: "En Estados Unidos no hay más que dos revistas literarias verdaderamente buenas. La primera es *The New Yorker*, pero la más brillante de las dos es SCIENTIFIC AMERICAN. Su equipo editorial es estupendo. Prefiero leer los anuncios de SCIENTIFIC AMERICAN a la mayor parte de la literatura que se publica en otros sitios." Los profesores de institutos y universidades encontraron en SCIENTIFIC AMERICAN el instrumento que les permitía estar al tanto de los avances científicos de forma rigurosa.

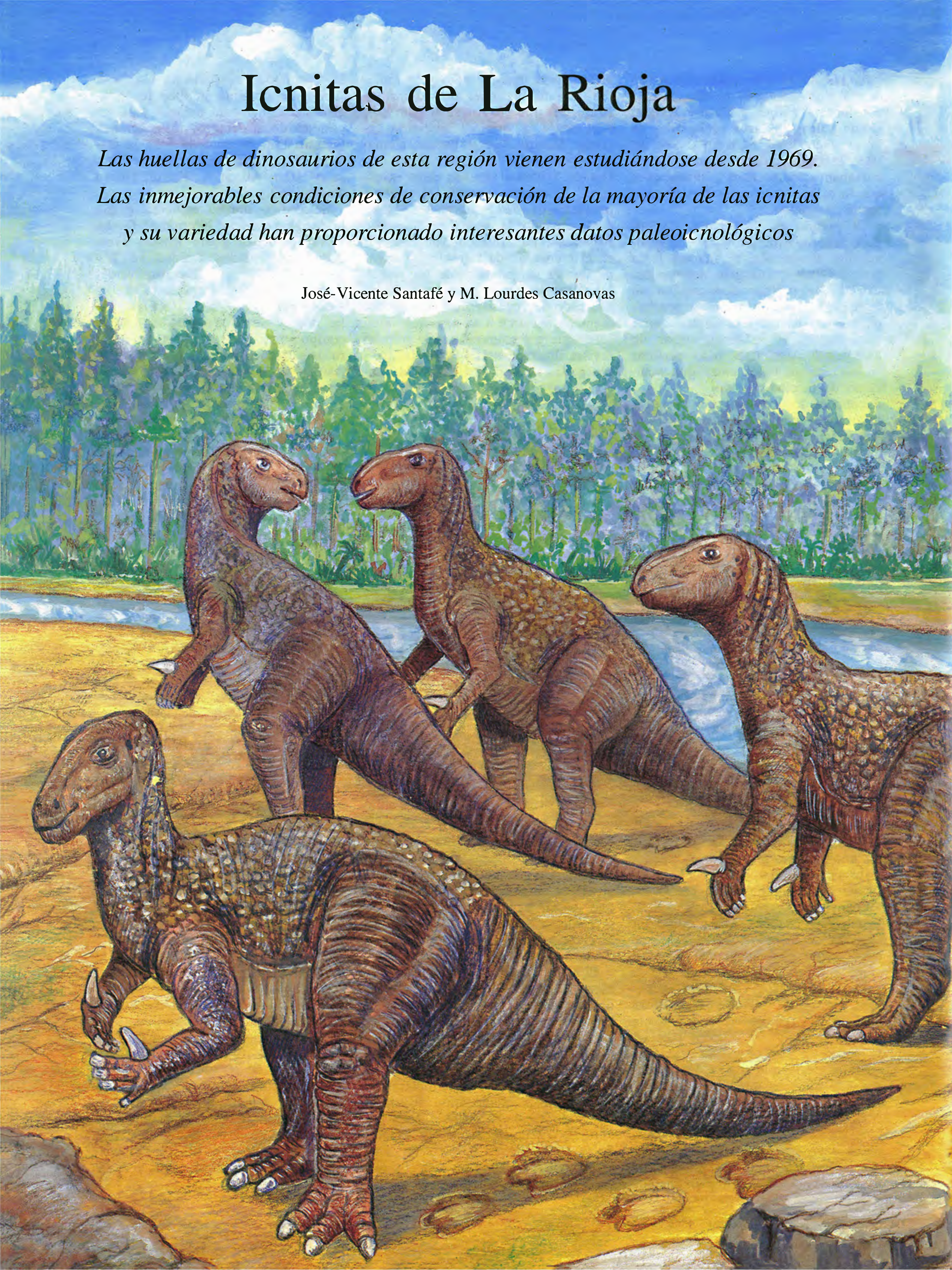
La empresa inicial se diversificó con el tiempo; empezaron a publicarse ediciones de SCIENTIFIC AMERICAN en idiomas distintos del inglés (entre las que INVESTIGACIÓN Y CIENCIA es la tercera por veteranía, tras las ediciones italiana y japonesa), se inició la publicación de libros (mediante la adquisición de W. H. Freeman & Co.) y, posteriormente, se creó una editorial médica (*Scientific American Medicine*). En 1986, *Scientific American, Inc.* entró a formar parte de uno de los grupos editoriales europeos más importantes, Georg von Holtzbrinck, GmbH. Nuevas colecciones de libros, nuevas revistas profesionales, productos editados por los nuevos medios electrónicos, etc., son parte de la actividad actual de la empresa.

Al celebrar el 150 aniversario de su publicación ininterrumpida, SCIENTIFIC AMERICAN puede enorgullecerse de contar cada mes con cerca de un millón de suscriptores y lectores, incluidos los de las diferentes ediciones traducidas, distribuidos por todo el mundo. A ellos seguirá dedicando SCIENTIFIC AMERICAN, y seguiremos dedicando nosotros, todos nuestros esfuerzos futuros en pro de "el progreso y la ampliación del conocimiento".

Icnitas de La Rioja

Las huellas de dinosaurios de esta región vienen estudiándose desde 1969. Las inmejorables condiciones de conservación de la mayoría de las icnitas y su variedad han proporcionado interesantes datos paleoicnológicos

José-Vicente Santafé y M. Lourdes Casanovas





1. RECONSTRUCCION paleoambiental del Cretácico inferior de la zona oriental de la Sierra de los Cameros (La Rioja). Los Iguanodontes era la fauna dominante.

La paleontología, que estudia la vida en el pasado, se apoya en dos tipos de pruebas: restos directos y restos indirectos. Huesos, escamas, dientes o conchas son ejemplos de restos directos. Los indirectos tienen que ver con los productos de la actividad de un animal; pertenecen a este grupo de pruebas las icnitas (huellas de pisada o de traslado), los coprolitos (heces fecales fósiles), los gastrolitos (piedras ingeridas por el animal para facilitar la digestión), los habitáculos y otros.

Entroncada en la paleontología, la paleoicnología se ocupa de las huellas de la actividad de los animales del pasado. Etimológicamente, deriva de los términos griegos *icnos* (impresión) y *páleos* (antiguo); la paleoicnología estudia, pues, las impresiones fósiles. La paleoicnología de vertebrados aborda las improntas de actividad y los terrenos donde éstas se conservan, para así conocer el modo de locomoción, paleoetología y paleoambiente de los animales que las dejaron.

Los primeros descubridores de icnitas o pisadas fósiles fueron pastores y campesinos, quienes las confundieron con huellas de animales fabulosos, o, en tiempos más cercanos, con animales de su entorno. (Entre las gentes de los pueblos riojanos de la Sierra de los Cameros corría la leyenda de que las icnitas de sus montes eran huellas del caballo de Santiago.)

La primera observación registrada de icnitas de dinosaurios fue realizada en 1802 por Pliny Moody, un campesino que encontró impresiones tridáctilas en South Hadley, Massachusetts. Se las supuso producidas por aves gigantescas, lo que se explicaba, en parte, por la estrecha semejanza que presentaban con pisadas de aves, y, en parte, porque se desconocía todavía la existencia de los dinosaurios. Esas huellas no se estudiarían hasta 35 años más tarde.

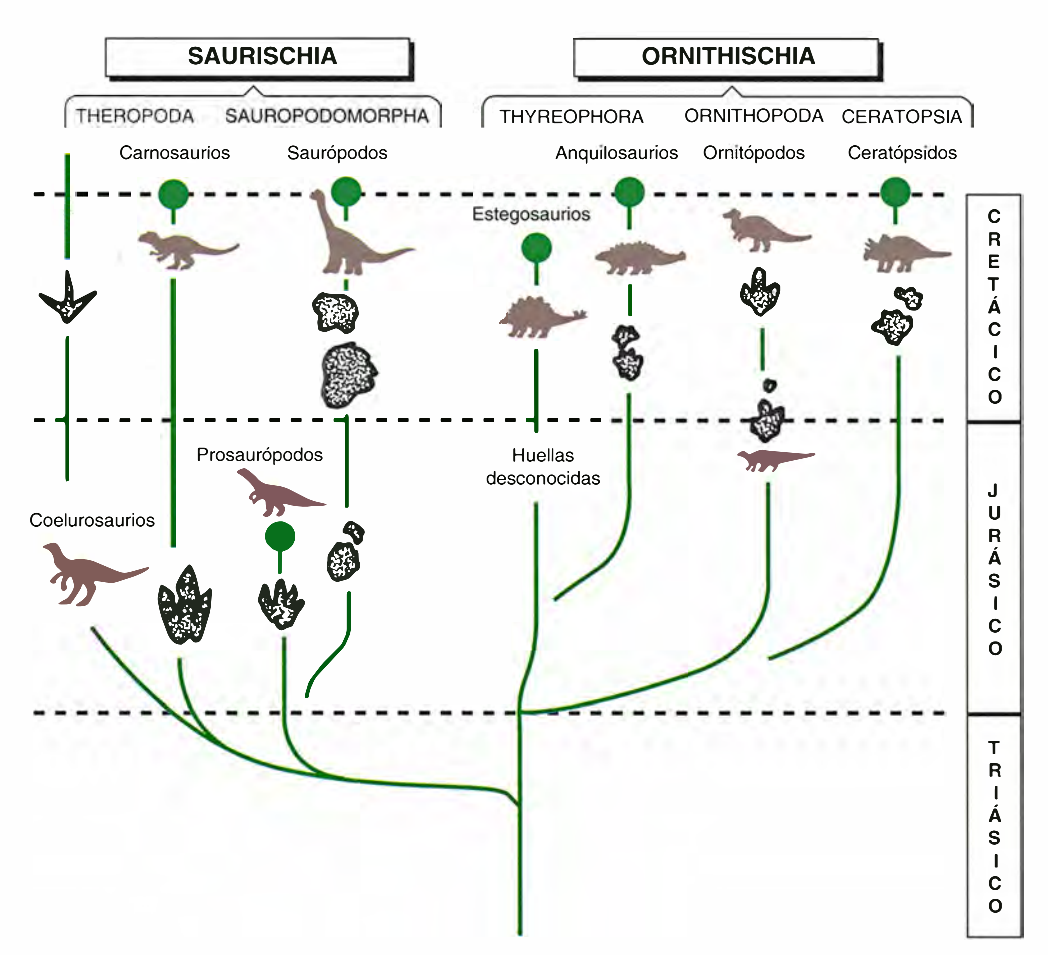
En Europa, las icnitas comienzan a investigarse en torno a 1820. En 1828 se describen ya las pisadas de Dumrfrieshire (Escocia), descubiertas en 1824. A lo largo de la década siguiente se descubren las icnitas de *Chirotherium*, del Triásico de Alemania. La peculiar forma de estas huellas, con el dedo V muy desarrollado y dirigido hacia fuera, retardó casi cien años la identificación de esas pisadas y su correcta atribución a Arcosaurios del Triásico, grupo que vivió antes de la diversificación de los dinosaurios. En América del Norte, E. Hitchcock publicó un primer trabajo en 1836, y en 1858 salió a la luz su tratado fundamental, *Ichnology of New England*.

JOSÉ VICENTE SANTAFÉ y M. LOURDES CASANOVAS se doctoraron en ciencias geológicas por la Universidad de Barcelona. Actualmente son investigadores del Instituto de Paleontología de Sabadell, dependiente de la Diputación de Barcelona. Con ellos comenzó en España el estudio y la interpretación de las huellas de dinosaurios.

Hacia 1860 se llega a la conclusión de que ciertas icnitas tridáctilas podrían ser de *Iguanodon*. Pero habrá que esperar hasta comienzos del siglo XX para que se produzca toda una cascada de descubrimientos de yacimientos por toda Europa occidental, desde la península Ibérica hasta las islas Británicas. En España, el primer hallazgo paleoicnológico del que se tiene noticia lo realizó Salvador Calderón, en 1897, al descubrir una huella de *Chirotherium* en Molina de Aragón (Guadalajara). Más tarde aparecieron otras icnitas que se asignaron a este mismo icnogénero. Citemos, a este respecto, los trabajos del jesuita Longinos Navas, en 1906, y de Joaquín Gómez de Llarena, en 1917.

En 1959, Pietro Leonardi acometió una revisión general de los trabajos presentados hasta entonces. A la luz de los estudios realizados sobre el icnogénero *Chirotherium* y la creación de varios iconosubgéneros, reclasificó las icnitas conocidas. Veinte años después, un equipo de paleontólogos en el que estaba integrado uno de los autores (Casanovas) creó una nueva especie, *Chirotherium catalaunicum*, para un resto hallado en el Triásico de Cervelló (Barcelona).

Pero el estudio de los dinosaurios en España habían empezado antes. En 1971 publicamos un pri-



2. ARBOL GENEALOGICO de los dos grandes grupos de dinosaurios: saurisquios y ornitisquios, los primeros con cintura pelviana de tipo saurio y los segundos de tipo ave. En el esquema se muestran las diferentes formas de huellas producidas por los distintos grupos: huella única propia de dinosaurio bípedo y huellas de pie y mano de dinosaurio cuadrúpedo.

mer trabajo sobre icnitas de La Rioja, en el que asignábamos las huellas a dinosaurios ornitópodos y terópodos del Cretácico inferior de la Sierra de Cameros, cuestión en la que abundábamos en otro trabajo sacado a la luz tres años después. Desde entonces se han sucedido casi ininterrumpidamente las campañas en esta zona, única por la cantidad y variedad de icnitas. Se han descrito también en otras regiones: en el Jurásico de Asturias, en el Cretácico inferior de Salas de los Infantes (Burgos) y de Galve (Teruel), y del Cretácico superior de Tremp (Lérida).

Recapitulando, podemos dividir en tres fases la historia de la paleoicnología: fase descriptiva, fase de aplicación de criterios anatómicos y biológicos y fase de aplicación de criterios mecánicos. La descriptiva abarca desde los inicios de la paleoicnología hasta 1925. En este período, se atiende sobre todo a la morfología de la icnita. Para ello se utilizaban, y continúan empleándose, la longitud de la pisada, la anchura, angulación interdigital y otros parámetros fundamentales.

La fase de aplicación de criterios anatómicos y biológicos empieza cuando W. Soergel se propone en 1925 reconstruir al creador de las huellas de *Chirotherium*. Se apoya en la estructura esquelética teórica, la longitud de la zancada y otros criterios anatómicos. Criterios que orientan también el cálculo de la longitud del tronco de dinosaurios cuadrúpedos a partir de la longitud de la icnita y la longitud de la zancada. Se investigan los aspectos paleoecológicos y paleoetológicos: el comportamiento gregario, estrategias defensivas y de ataque, y vida terrestre de los saurópodos, que, por su gran tamaño, se les creyó incapaces de caminar fuera del agua.

La fase de aplicación de criterios mecánicos se inicia en 1976, cuando R. M. Alexander se apresta a establecer un método para calcular la velocidad de progresión de un dinosaurio a partir de la longitud de las icnitas y del valor de la zancada. En esa línea, Georges R. Demathieu desarrolló otro sistema a partir del período del péndulo compuesto, que asimilaba al movimiento del autópodo. Por último, Richard A. Thulborn ha determinado la velocidad máxima teórica de diversos grupos de dinosaurios separándolos por su modo de desplazarse (marcha, trote, carrera). De estos modelos nos ocuparemos más adelante. Antes necesitamos algunas nociones de sistemática.



3. ICNITAS del yacimiento de los Cayos A, situado en el barranco del mismo nombre. Consta de 36 rastros con un total de 193 icnitas. Se encuentran, además, numerosas impresiones aisladas.

Una línea filogenética nos lleva a los dinosaurios saurópodos y terópodos. Los saurópodos, cuadrúpedos y herbívoros, eran de enorme talla y andar pacífico. Los terópodos, bípedos y carnívoros, se clasifican a su vez, atendiendo a sus huellas, en dos grupos extensos: los Carnosaurios, cuyas huellas superan los 20 centímetros de longitud, y los Coelurosaurios, autores de icnitas menores.

Una segunda línea filogenética conduce a otro haz de grupos: ornitópodos, ceratópsidos, estegosaurios y anquilosaurios. Los ornitópodos, bípedos la mayoría de las veces y herbívoros, tienen su representante principal en el *Iguanodon*, perteneciente al grupo de los Iguanodóntidos de los que más tarde derivarían los Hadrosaurios, o dinosaurios de "pico de pato". Los estegosaurios estaban provistos de una armadura formada por placas y espinas. Auténticos acorazados eran los anquilosaurios, de cuerpo cubierto por placas, escudos o espinas; por último, los ceratópsidos eran dinosaurios que portaban cuernos. Mal conocidos aún, sobre todo en Europa, los tres últimos grupos, cuadrúpedos y herbívoros, han dejado pocas icnitas.

Las pisadas se formaban, a la manera de moldes, sobre la superficie. Si la superficie era de grano fino y cohesivo, ni demasiado húmedo ni demasiado seco, y si el animal andaba despacio, se realizaba una perfecta impresión, de los pies si era bípedo, y de los pies y las manos si cuadrúpedo. Se apreciarán quizá las señales de uñas o garras, de los almohadillados de los dedos, de la forma del talón. Si el sustrato era excesivamente húmedo, el molde quedaba distorsionado: demasiado marcado, produciendo una huella profunda; o perdido, si el agua la cubría, acabando por borrar la marca. Las marcas impresas en las playas o estuarios someros se destruían en la nueva avenida del agua; las impresas en la arena de las dunas las borraban el viento y las arenas movedizas. Las señales dejadas por animales que corren no suelen ser completas; a menudo retienen sólo las impresiones de los dedos.

Las circunstancias más favorables para la preservación de las huellas son el final de la fase de avance del agua, cuando los sedimentos de grano fino se van secando gradualmente. Si las aguas turbulentas de una tormenta invaden los moldes frescos, éstos, inundados, desaparecerán. Las huellas dejadas por un sujeto pesado sobre material sedimentario menos friable sobrevivirán mejor que si se trata de moldes arcillosos.

Los principales yacimientos españoles de huellas de dinosaurios, los más estudiados también, comprenden una amplia zona que se extiende entre las sierras de Cameros, Achena y Alcorama. La mayoría de las icnitas descubiertas en La Rioja están situadas entre las cuencas de los ríos Leza, Jubera, Cidacos y Alhama, sobre sedimentos pertenecientes, en su mayoría, al grupo de Enciso, caracterizado por calizas lacustres, margas y areniscas carbonatadas de ambientes dulceacuícolas y salobres, provenientes de probables llanuras de inunda-

ción ocasionadas por pequeñas transgresiones y regresiones marinas.

No puede acotarse todavía con precisión la edad de los terrenos. Sabemos que pertenecen al Cretácico inferior, pero se discute si son del Valanginiense inferior (hace 130 millones de años) o del Aptiense (hace 114 millones de años). No podrá avanzarse con seguridad en la datación de estas formaciones continentales weáldicas, mientras no existan aportaciones coincidentes del estudio de las caráceas, ostrácodos y foraminíferos de las intercalaciones marinas.

En líneas generales diremos que, en el Cretácico inferior, la placa Ibérica estaba situada entre los paralelos 20 y 30, es decir, en un régimen relativamente tropical. Por consiguiente, el clima era cálido y húmedo. Durante el mencionado período geológico, la placa sufrió un movimiento de rotación en sentido inverso al de las agujas del reloj; en el sector oriental se formaron tres cuencas sedimentarias continentales: la cuenca Ibérica, la cuenca del Maestrazgo y la cuenca de Cameros; las dos primeras se abrían hacia el mar de Tetys. La cuenca de Cameros está dividida en dos sectores, el oriental y el occidental. En el primero de ellos se han hallado la mayor parte de icnitas de dinosaurios; del sector occidental sólo se han citados tres afloramientos: Regumiel de la Sierra, Salas de los Infantes y Mambrillas de Lara.

En el paisaje en el que vivieron estos dinosaurios predominaban en un principio las cicadales, los ginkgos, las coníferas y las gimnospermas. Extensas selvas de coníferas, que se alzaban hasta 60 metros de altura, creaban una densa techumbre bajo la cual medrarían los grandes helechos. A finales del Cretácico, cedieron la primacía a las plantas angiospermas.

Acompañando a los dinosaurios vivían otros reptiles. Cocodrilos monstruosos de más de 15 metros de longitud recorrían los pantanos. Por los alrededores merodeaban tortugas gigantescas. Los bosques de las riberas de los lagos estaban poblados de lagartos, salamandras y gran variedad de insectos. Micromamíferos insectívoros buscaban refugio y se ocultaban de los depredadores.

En la región oriental de La Rioja destacan los yacimientos del Villar, la Cuesta de Andorra, Valdecevillo y Guilera, por ser los primeros que fueron dados a conocer y que sirvieron de base para todos los estudios posteriores. En ellos se aprecian las huellas dejadas por el paso de terópodos grandes (Valdecevillo), medianos (El Villar de Enciso), ornitópodos de gran talla (Cuesta de Andorra) y de talla media en Valdecevillo, así como rastros de saurópodos en este último yacimiento.

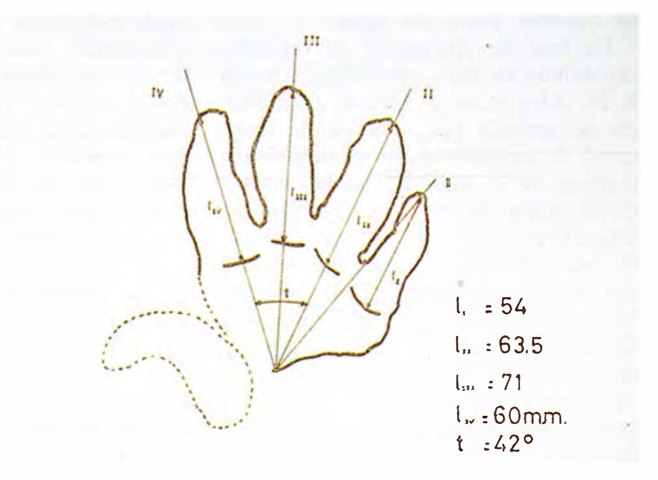
A partir de nuestros trabajos, a principios de los años setenta, otros investigadores trabajaron la zona. Luis I. Viera, José A. Torres y Luis M. Aguirrezabala, de la Sociedad Aranzadi del País Vasco, descubrieron nuevos yacimientos y reestudiaron otros ya conocidos, ampliando el número de icnitas citadas en estos últimos y atribuyéndolas también a terópodos de gran tamaño, a Coelúridos y a Iguanodóntidos.

Por su parte, el equipo dirigido por Félix Pérez Lorente, del Colegio Universitario de La Rioja, abordó en las postrimerías de los setenta el estudio de las icnitas fósiles de La Rioja, contando con la colaboración del Instituto de Paleontología de Sabadell. Descubrió nuevos yacimientos, algunos de los cuales aportaron icnitas con características especiales dignas de mención; por ejemplo: el yacimiento de Soto 2, formado por icnitas de saurópodos hasta ahora escasas en la bibliografía, y el yacimiento de la Era del Peladillo, donde se han hallado huellas de dinosaurios tridáctilos con membrana interdigital, lo que ha obligado a crear un nuevo icnogénero y una nueva icnoespecie, *Hadrosaurichnoides igeensis*. Hasta ahora, la membrana interdigital se consideraba propia de los Hadrosaurios del Cretácico superior.

Joaquín Moratalla, de la Universidad Autónoma de Madrid, al reinterpretar las icnitas riojanas, ha creado nuevos icnogéneros y nuevas icnoespecies. Entre los terópodos numera a *Therangospodus oncalensis*, de pie angosto y situado en el grupo estratigráfico de Oncala en que se incluye *Filichnites gracilis*, un terópodo cuya icnita tenía los dedos delgados y gráciles. Dentro de los terópodos anota también a *Bückeburgichnus maximus*, icnogénero e icnoespecie creados por Abel en 1935, que simbolizan una icnita tridáctila de gran tamaño con dígitos anchos y robustos, con terminación distal acuminada, formando rastros bípedos y estrechos. Establece dos nuevas icnoespecies de ornitópodos: *Brachyguanodonipus prejanensis*, para icnitas de iguanodóntido con un autópodo ancho y robusto, e *Iguanodonipus cuadrupedae* para unas icnitas de tipo *Iguanodon*, de talla media a grande, dígitos anchos, cortos y robustos, que ocasionalmente presentan rastros cuadrúpedos, con las improntas delanteras elongadas en sentido transversal y bilobuladas. La disposición de las huellas de las manos es anterior a la de los pies.

Hemos de saber que en la progresión bípeda de terópodos y ornitópo-





4. HUELLA DE PIE DERECHO de *Chirotherium catalaunicum* hallada en terrenos del *Bundsandstein* (Triásico) de Cervelló, y formada hace unos 250 millones de años. Estudiada por los autores en 1979, resalta la hipotética posición del dedo quinto, característica del género *Chirotherium*; la primera icnita española de éste la descubrió en 1897 Salvador Calderón.

dos, las icnitas presentan rotación interna. Si trazamos el eje de la pista, las huellas tienden a dirigirse hacia el mismo. Este carácter parece causado por un fenómeno de convergencia, donde el movimiento de la cadera, a pesar de las diferencias pelvianas entre terópodos y ornitópodos, sería similar, y la cola ejercería un contrapeso de equilibrio durante la marcha. Por contra, en la progresión cuadrúpeda, la de saurópodos por ejemplo, las icnitas presentan rotación externa.

Para Moratalla, los rastros cuadrúpedos de iguanodóntidos muestran que empleaban la progresión cuadrúpeda cuando les convenía. No obstante, las icnitas de las extremidades posteriores presentan rotación interna, como si se tratara de un rastro bípedo. El uso de una cuadrupedia opcional no modifica ni la ligera rotación pelviana ni la función de la cola.

Para determinar la biomecánica de los dinosaurios se recurre a la modelización a partir de animales actuales. En 1976 Alexander propuso un método para estimar la velocidad de los dinosaurios en sus distintos tipos de marcha por los suelos cretácicos. Consiste en establecer una relación entre la velocidad que lleva el animal (incógnita a calcular), la longitud de la zancada y la longitud de la huella, ambas medibles en el campo. El principio físico subyacente es el de similitud física, teoría según la cual para animales de forma parecida, aunque de distinto tamaño, se mantendrán aproximadamente constantes ciertos parámetros relativos. Alexander considera dos parámetros: número de Froude y relación entre la zancada y la longitud de la extremidad.

El número de Froude se emplea en todas aquellas situaciones donde interaccionan inercia y gravedad. Equivale a v^2/gl, siendo v la velocidad del animal, g la aceleración de la gravedad y l la longitud. Esta última, en la locomoción terrestre, se sustituye por h, que representa la altura del acetábulo, por lo que el número de Froude se transforma en v^2/gh.

El segundo parámetro de Alexander establece la relación entre la zancada (λ) y la longitud de la extremidad (h). A partir de observaciones empíricas, Alexander fija la siguiente relación: $\lambda/h = 2{,}3\ (v^2/gh)$, de donde se deduce la fórmula definitiva $v = 0{,}25\ g^{0{,}5} \times \lambda^{1{,}57}\ h^{-1{,}17}$

El único problema que se presenta en el cálculo de la velocidad estriba en el valor de h, la longitud de la extremidad. Para Alexander, hay que suponerla unas cuatro veces la longitud de la icnita, dado que el autópodo sólo se apoya en el sustrato por medio de la articulación falangesmetatarso, pero no interviene la articulación tarsometatarsal. Se ha comprobado, sin embargo, que la razón entre longitud de la extremidad y longitud de la icnita, calculada en esqueletos, es variable; aunque su valor oscile alrededor de cuatro, una sobreestima o infravaloración de h vendrá acompañada de infravaloración o sobrestimación de la velocidad. En el caso de los mamíferos y según Alexander, si el número de Froude es igual a 0,6 y la razón entre zancada y longitud de la extremidad alcanza el valor de 2,0, el animal camina; si se supera ese valor de 2,0, va al trote o corre. En su opinión, igual sucede con los dinosaurios.

Demathieu propuso en 1984 un segundo método. A grandes rasgos, se trata de un sistema en el que el movimiento del autópodo se asimila a un modelo pendular: cuando los animales se desplazan, las extremidades se comportan como péndulos. En este caso los elementos a considerar

5. ICNITA Y RASTRO de un dinosaurio bípedo. La icnita esquematizada es de tamaño medio, con una longitud del dedo central de 26 centímetros y una anchura máxima de 26,5 cm. Se trata de una huella estilizada, de dedos largos terminados en garras y de talón bastante amplio. Posiblemente pertenezca a un dinosaurio terópodo. El rastro, por su parte, corresponde a tres huellas consecutivas. Para el estudio de los rastros o pistas se toman diversas medidas: longitud de paso (LP_1 y LP_2), longitud de zancada (l), anchura de pista (AP) y ángulo de paso (γ). A partir de estas medidas y las propias de cada icnita se podrá establecer la longitud de las extremidades posteriores, así como la posible velocidad de marcha del autor del rastro.



6. EL YACIMIENTO DE VALDECEVILLO incluye tres icnitas de un terópodo carnosaurio, de gran tamaño. En el mismo yacimiento hay icnitas de menor tamaño y relativa mala conservación, así como huellas de saurópodos.

son la velocidad del animal (v), la zancada (E), la aceleración de la gravedad (g) y cierto parámetro, l', que resulta de la asimilación de la extremidad del animal a un cono de revolución invertido y es la razón entre el radio de la base del cono y la altura del mismo. Todos estos factores se relacionan en la ecuación: $v = 1/2\,\Pi\,E\;g^{0.5}\,l'^{-0.5}$. Para ser más exactos, $l' = (3R^2 + 2h^2)/5h$, donde h se puede estimar por el método de Alexander y R es el radio del muslo.

En una simplificación posterior de su método, Demathieu conviene en que el valor de R varía desde $h/6$ a $h/11$. Si R es igual a $h/6$, entonces l' valdrá $0{,}416667h$; si equivale a $h/11$, entonces l' será igual a $0{,}404959h$. A partir de estos datos, calcula que la velocidad, en kilómetros por hora, se expresa mediante la multiplicación de una constante (de valor 0,036) por un parámetro que denomina T, igual a $0{,}128451\sqrt{h}\,(1 + \theta^2/16)$ en el que $(1 + \theta^2/16)$ se puede despreciar si el ángulo es menor de 20 grados. En la determinación de h, altura del acetábulo, deben tenerse en cuenta los datos de varias pistas de una misma icnoespecie, el grupo zoológico atribuido al autor de las huellas y la relación entre zancada y longitud del pie de acuerdo con su punto de apoyo (digitígrado, semiplantígrado o plantígrado).

Un tercer método es el de Richard A. Thulborn y Mary Wade, quienes han trabajado sobre huellas de dinosaurios bípedos y han refinado la estimación de la altura del acetábulo y la velocidad. A la hipótesis de Alexander según la cual, cuando el valor de λ/h es mayor que 2,0, los dinosaurios trotan o corren, Thulborn y Wade añaden que, si ese valor está entre 2,0 y 2,9, los dinosaurios trotan y, corren, si λ/h es mayor que 2,9. Señalan, asimismo, que la longitud de la huella viene a equivaler a la longitud del metatarsiano III (MT), salvo en el caso exclusivo de los terópodos de la familia Ornithomimidae; en éstos, MT es aproximadamente vez y media la longitud de la huella. A partir del valor de MT se calculará la altura del acetábulo, que es suma de la longitud del fémur, la tibia y el metatarsiano III, con coeficientes de corrección según sea el grupo dinosaurio considerado: pequeños terópodos, grandes terópodos, ornitomímidos, ornitópodos cursiorales (los que tienen el fémur más corto que la tibia), ornitópodos graviportales (con el fémur más largo que la tibia), ornitópodos en general, terópodos en general y dinosaurios bípedos en general.

Después del estudio de Thulborn sobre 276 icnitas de dinosaurio parece demostrado que la marcha normal de los dinosaurios es el caminar. Excepcionalmente se produce la carrera (en una estampida por ejemplo, en un ataque a otro dinosaurio o una escapada de este último) y en contadas ocasiones avanzan al trote. En las icnitas de la sierra de Cameros, raramente hemos encontrado valores de λ/h superiores a 2,0.

De la investigación sobre las icnitas de la cuenca de Cameros podemos inferir algunas consideraciones paleobiológicas de interés. En primer lugar, y pese a la variación de velocidades registradas en las pistas, el valor de λ/h en muy raras ocasiones supera el umbral de 2,0 y, casi siempre, es inferior. Parece claro que el modo de locomoción de los autores de estas icnitas era la marcha. Ahora bien, λ/h varía ostensiblemente dentro del intervalo 0-2,0, variación que en la mayoría de las ocasiones va ligada al grupo de dinosaurios de que se trata. Así, los terópodos presentan valores más altos de λ/h que los ornitópodos; dentro de cada grupo pueden separarse los mayores y menos gráciles, con valores de λ/h menores que los ofrecidos por los sujetos menos pesados y más gráciles, en los que el valor de λ/h se aproxima a 2,0.

Debemos atender también a la dirección de progresión en la pista. Hemos encontrado sentido de avance común en el yacimiento de Valdevajes; según Moratalla ocurre lo mismo en los Cayos A. El fenómeno admite diversas interpretaciones. Por un lado, puede revelar que se trata de un grupo que avanza conjuntamente; por otro lado, pudiera ser que la existencia de algún condicionante geográfico obligue a pasar por un determinado sitio para quienes van en busca de alimento o agua. No son hipótesis excluyentes, si tenemos en cuenta que en los yacimientos de La Rioja existen indicios claros de gregarismo en diversos tipos de icnitas: grandes ornitópodos junto con pequeños en la Cuesta de Andorra, pequeños terópodos en Valdevajes y también en los Cayos A y B.

En resumen, pues, la región de La Rioja presentaba en el Cretácico inferior las condiciones idóneas para preservar las huellas que los dinosaurios, reptiles dominantes, producían en su deambular. La abundancia y calidad de las icnitas han atraído el interés de los estudiosos, nacionales y extranjeros. Conscientes de su valor para la ciencia, los lugareños vigilan su conservación contra el arrasamiento vandálico de las mismas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESTIMATES OF SPEED OF DINOSAURS. R. M. Alexander en *Nature*, vol. 261, páginas. 129-130, 1976.

RESTOS INDIRECTOS DE DINOSAURIOS DEL REGISTRO ESPAÑOL: PALEOICNOLOGÍA DE LA CUENCA DE CAMEROS (JURÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO INFERIOR) Y PALEOLOGÍA DEL CRETÁCICO SUPERIOR. J. Moratalla, (Tesis) Universidad Autónoma de Madrid, págs. 1726; 1993.

DINOSAUR TRACKS por T. Thulborn. Chapman and Hall. 1990.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Electroimanes de pulsos

Potentísimos electroimanes que acumulan energías elevadísimas compiten a lo ancho del mundo por hacer progresar la ciencia de los materiales y la física

Greg Boebinger, Al Passner y Joze Bevk

El 3 de diciembre de 1992 empezó como muchos otros días. Llevábamos meses estudiando el mecanismo en virtud del cual un intenso campo magnético anula la superconductividad, es decir, la total ausencia de resistencia eléctrica de ciertos materiales. Nuestro electroimán de alta intensidad, proyectado y construido 11 meses antes, había generado ya miles de pulsos de campo magnético, cada uno de ellos de intensidad más de un millón de veces la del campo magnético terrestre y de energía comparable a la explosión de un cartucho de dinamita acumulada en el tamaño de un puño.

Según lo acostumbrado, sumergimos el electroimán en nitrógeno líquido para reducir la resistencia eléctrica de los hilos de sus devanados. La muestra experimental, uno de nuestros primeros superconductores de alta temperatura, estaba colocada en el centro del imán. Cerramos y aseguramos la compuerta del búnker de acero que contenía el imán, su fuente de alimentación y todos los equipos de recogida de datos. A continuación, a través de una secuencia de preparación y carga, la tensión de alimentación se fijó en 7600 volts. Entonces, uno de nosotros apretó el botón de "disparo", y ahí acabó el experimento. Se oyó una explosión, y los respiraderos del búnker vomitaron helados chorros de nitrógeno superenfriado, indicando sin lugar a dudas un fallo catastrófico del imán.

Ya recobrada la calma, entramos en el búnker para examinar los daños. Verdaderamente hubiese podido ser peor. En 1988, al probar nuestro primer electroimán de pulsos con medios y laboratorio gentilmente cedidos por un colega de Bélgica, pagamos su hospitalidad con un fallo de tal magnitud que volaron grandes trozos de acero por toda la sala. Esta vez no se llegó a tanto: la gruesa cámara de acero que rodeaba el imán estaba intacta, pero las fuerzas mecánicas generadas por el campo habían hecho saltar los ocho pernos de fijación de acero, levantando y lanzando luego el propio imán (de unos 27 kilogramos de peso y el tamaño de un bote de pintura grande), que destruyó equipos cercanos y dobló una placa de aluminio del suelo, de más de un centímetro de grosor. La muestra que teníamos en estudio nunca más apareció.

¿Por qué pasamos tales fatigas nosotros y quienes, en un par de docenas de laboratorios del mundo, nos dedicamos a estos asuntos? En verdad, la carrera hacia imanes más potentes encierra todo un reto. Estimula a desarrollar nuevos materiales, a la par conductores y aislantes, ampliando los límites en cuanto a resistencia, ductilidad y propiedades eléctricas. Además, en muchos casos la creación de estos imanes es un medio, no el fin, de la investigación. La generación de campos magnéticos de altísima intensidad puede servir a múltiples propósitos, desde el desarrollo de imanes permanentes más potentes hasta la exploración del complejo comportamiento de los electrones en materiales avanzados, cada uno de ellos una nueva manifestación del propio electromagnetismo.

Los imanes permanentes son componente esencial de muchos motores eléctricos y altavoces de audio, y sus sucesivas mejoras han permitido la miniaturización y portabilidad de estos productos. Existen muchos tipos de motores eléctricos, pero en todos ellos el movimiento proviene de la interacción de corrientes eléctricas y campos magnéticos. Si se construyen imanes permanentes más potentes, los motores podrán ser menores, de mayor potencia y más ligeros. Y ello reviste particular interés cuando se requiere movilidad y alimentación por baterías, como en los robots móviles y las unidades de disco de ordenadores portátiles. La interacción controlada entre imanes permanentes y electroimanes es también esencial para los altavoces; hace unos diez años que aparecieron de repente unos auriculares pequeños, ligeros y de alta fidelidad, fruto del desarrollo comercial de unos imanes de mayor potencia, los de samario-cobalto.

Materiales duros

Estos imanes permanentes se denominan materiales magnéticos "duros". Los prototipos nuevos o experimentales se prueban de manera rutinaria con electroimanes de pulsos, de muy alta potencia. En estos ensayos, en los que se utilizan campos de pulsos, revelan la intensidad y tenacidad con que se magnetizan los nuevos materiales. Se llaman "duros" para distinguirlos de los materiales "blandos", que cambian con

1. ELECTROIMAN DE PULSOS formado por una bobina de hilo de gran resistencia alojada en una cámara de acero. Este imán genera campos cercanos a los tres cuartos de millón de gauss en un volumen de un centímetro cúbico situado en su centro. Los pernos permiten aplicar una presión constrictora a la bobina; los dos vástagos de cobre son los contactos eléctricos de la propia bobina.

GREG BOEBINGER, AL PASSNER y JOZE BEVK investigan en los Laboratorios Bell de AT&T en Murray Hill, New Jersey. Boebinger y Passner colaboran en todos los aspectos del proyecto, construcción, utilización y eventual desintegración de los electroimanes de pulsos. Boebinger se ha servido de los campos magnéticos para estudiar microestructuras semiconductoras y superconductores orgánicos y de altas temperaturas. Passner ha trabajado en biestabilidad óptica de sólidos y en una "botella" de antimateria magnética para atrapar un plasma de positrones. Bevk, experto en materiales compuestos filiformes ultrafinos, se dedica a transistores de silicio menores de un cuarto de micrometro.

facilidad su estado de magnetización y han encontrado extensas aplicaciones en cintas magnetofónicas, discos duros y discos flexibles de ordenador.

Otras aplicaciones, más exóticas, de los imanes potentes son la levitación y propulsión de los trenes de alta velocidad, así como el lanzamiento de proyectiles mediante campos magnéticos de pulsos. En los reactores experimentales de fusión nuclear, potentes imanes de pulsos confinan el plasma que acomete la fusión, puesto que dicho plasma está demasiado caliente para alojarse en cualquier recipiente sólido. En algunas aplicaciones fascinantes, los electroimanes sirven de instrumentos para realizar delicados experimentos de física en un entorno de alto riesgo. Su descripción adecuada, sin embargo, requiere ciertos fundamentos y una perspectiva histórica.

Como la gravedad, el magnetismo forma parte de nuestra vida diaria. En refrigeradores, puertas y pinzas que sujetan fotografías o papeles diversos, proliferan los imanes permanentes de hierro. Otro imán familiar es la aguja de la brújula, constantemente alineada con el débil campo magnético de la Tierra.

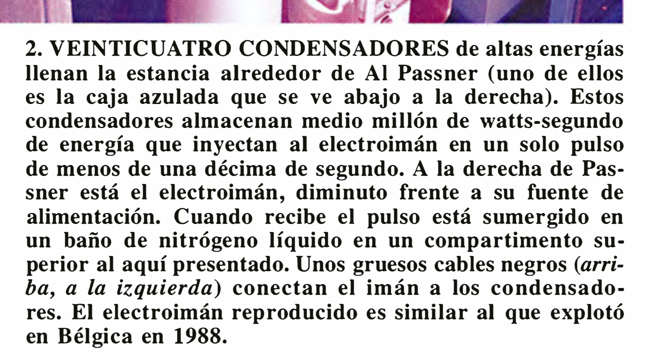
Los imanes permanentes son una manifestación macroscópica del minúsculo campo magnético que acompaña a cada electrón: su "espín". No quiere decirse con ello que el electrón esté realmente girando; esta prosaica terminología se limita a expresar que, si el electrón fuese una pequeña esfera de carga eléctrica negativa, tendría que girar para generar el campo magnético observado. Si bien todos los materiales contienen alrededor de 10^{24} electrones por centímetro cúbico, en la mayoría los electrones orientan sus espines en direcciones erráticas y, por tanto, los campos magnéticos no pueden anularse entre sí. En los imanes permanentes, por otra parte, los espines electrónicos están alineados —en proporción del 1 al 10 % como caso típico— dentro de dominios magnéticos; cada una de estas pequeñas regiones actúa como un solo imán microscópico permanente, creado por los campos de muchos electrones individuales. Con materiales adecuados, un tratamiento conveniente y algo de suerte, puede lograrse que los campos de todos los dominios se



alineen y resistan cambios, produciendo un poderoso imán permanente. Para que tales imanes sean de mayor potencia habrá que alinear tantos espines electrónicos cuantos sea posible.

Aunque el conocimiento del magnetismo se remonta a los griegos y a los romanos, hace sólo 175 años que se descubrió que la electricidad y el magnetismo eran dos componentes de una sola fuerza: el electromagnetismo. En 1821, André-Marie Ampère estableció que el magnetismo está engendrado por cargas eléctricas en movimiento. Reconoció que una bobina de hilo recorrida por una corriente eléctrica produce un campo magnético que sale de un extremo de la bobina y entra por el otro, igual que el campo magnético de un imán permanente. En un electroimán de este tipo, el campo es más intenso en el centro de la bobina.





2. VEINTICUATRO CONDENSADORES de altas energías llenan la estancia alrededor de Al Passner (uno de ellos es la caja azulada que se ve abajo a la derecha). Estos condensadores almacenan medio millón de watts-segundo de energía que inyectan al electroimán en un solo pulso de menos de una décima de segundo. A la derecha de Passner está el electroimán, diminuto frente a su fuente de alimentación. Cuando recibe el pulso está sumergido en un baño de nitrógeno líquido en un compartimento superior al aquí presentado. Unos gruesos cables negros (*arriba, a la izquierda*) conectan el imán a los condensadores. El electroimán reproducido es similar al que explotó en Bélgica en 1988.

Hacia 1825, Ampère y Michael Faraday habían investigado, cada uno por su lado, las fuerzas mecánicas que actúan sobre hilos conductores de corriente dentro de un campo magnético. Son ellas las que mueven todos los motores eléctricos, desde los muy potentes de las locomotoras hasta los diminutos de los relojes de cuarzo. Y también las que destruyeron nuestro imán el 3 de diciembre de 1992.

No solamente los electrones crean en su movimiento campos magnéticos; también, según descubrieron Ampère y Faraday, los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre las cargas eléctricas que se mueven. En la mayoría de las muestras en estudio, éstas son electrones, que en los metales se desplazan con libertad y en los cuerpos aislantes recorren órbitas centradas sobre determinados núcleos atómicos. Los campos magnéticos actúan sobre ambos tipos de movimiento electrónico orbital, y la aplicación de un campo magnético externo hace que los espines de los electrones se alineen.

Estos principios determinan que los imanes potentes sean muy útiles para la experimentación. La superconductividad, por ejemplo, proviene del emparejamiento de electrones cuyos espines están alineados en sentidos opuestos. Estas parejas de electrones, agrupados por cierta energía de enlace, recorren el superconductor sin encontrar resistencia. Un campo magnético suficientemente intenso puede inyectar la energía necesaria para romper esa unión y destruir la superconductividad. Este fenómeno es de utilidad para estudiar el comportamiento en baja temperatura de estos materiales en ausencia de superconductividad. Dado que muchos de los superconductores en alta temperatura mantienen tal característica aun dentro de campos magnéticos intensos, los imanes de pulsos, creadores de campos elevadísimos, ofrecen la única oportunidad de realizar ese tipo de experimentos.

Cuanto más intenso sea el campo magnético aplicado, más alcance energético tendrá el sondeo del comportamiento electrónico. Hay fenómenos electrónicos que sólo pueden provocarlos campos magnéticos extraordinariamente intensos. A estos niveles, además, el efecto sobre las propiedades eléctricas puede ser espectacular: la anulación de la superconductividad o la conversión de un aislante en metal, por ejemplo. Tales transformaciones pueden ser bastante bruscas, una vez que la energía de la sonda se hace comparable (o entra en resonancia) con la energía de enlace del superconductor, una característica del material que se prueba.

Encontramos otro ejemplo en física de semiconductores. Al aproximarse la dimensión característica de un circuito a 0,1 micrometros, los electrones de su interior quedan tan confinados que ya no pueden transportar cantidades de energía arbitrarias. Antes bien, a semejanza de los electrones del átomo, están restringidos a niveles de energía discretos, susceptibles de trasladarse o dividirse en niveles múltiples por acción de un campo magnético. Los intervalos entre esos niveles de energía se miden aplicando campos magnéticos intensos y observando su efecto en alguna propiedad física del material, frecuentemente la resistencia eléctrica o la absorción de la luz. Un aumento súbito de tal absorción indicaría que se ha conseguido una resonancia entre los cambiantes intervalos que separan niveles de energía electrónicos y la energía de la sonda óptica. Estos experimentos han permitido comprender mejor el comportamiento de los pequeños dispositivos semiconductores, logrando a veces descubrir un fenómeno de campo enteramente nuevo.

Los límites reculan

¿Cuál es, pues, la intensidad de un campo magnético? Tomando el gauss como unidad, señalaremos que la intensidad del campo magnético de la Tierra es aproximadamente de medio gauss. Los imanes de hierro utilizados en frigoríficos y sujetapapeles son de algunos centenares de gauss. Los imanes permanentes de mayor potencia, como los de samario-cobalto o neodimio-hierro-boro, crean campos de 3000 a 4000 gauss, y varios de ellos podrían

levantar con facilidad el frigorífico en peso.

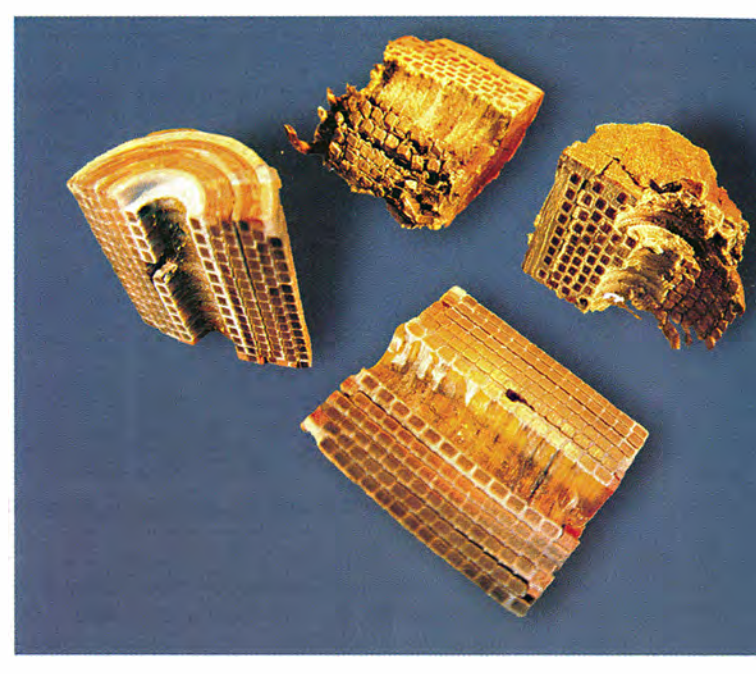
Aunque no hay duda de que van a mejorarse los imanes permanentes, su máxima intensidad final estará probablemente restringida a unos 30.000 gauss, sin otra razón que la de llegar al límite de la densidad de electrones cuyos espines pueden alinearse. La construcción de imanes permanentes de mayor tamaño aumenta fundamentalmente la extensión del campo magnético, no su intensidad. Así, los campos más intensos son los producidos por electroimanes, cuyo magnetismo es mera secuela del movimiento de las cargas.

En nuestro laboratorio hemos conseguido campos magnéticos de 730.000 gauss. (Para no alardear de ello, recordemos que la naturaleza crea un campo de 10^{12} gauss en la superficie de las estrellas de neutrones.) La generación de campos tan intensos requiere aplicar al electroimán un impulso de corriente eléctrica que supere, aunque sea por un momento, la corriente que circula por 15.000 bombillas de 100 watts. Puesto que las fuerzas de origen magnético ejercidas sobre hilos que conducen corriente son proporcionales al producto de la corriente eléctrica y la intensidad del campo magnético, nuestros hilos están sujetos a una presión explosiva mayor que 14.000 kilogramos por centímetro cuadrado, 35 veces la presión que gravita sobre el fondo oceánico a 4000 metros de profundidad.

En principio, el campo que puede generar un electroimán no tiene límites: una corriente infinita produciría un campo magnético de infinita intensidad. Pero la naturaleza no se presta a tales excesos. Cuando los campos exceden de medio millón de gauss, las fuerzas ejercidas sobre el hilo conductor sobrepasan la resistencia a la tracción del cobre endurecido. La resistencia del conductor suele ser factor limitante del campo alcanzable, con lo cual la construcción de imanes se convierte en un vivero de desarrollos y pruebas de conductores de alta resistencia.

La fuerza mecánica que produce el campo magnético no es el único obstáculo. La corriente eléctrica necesaria para crear ese campo genera una enorme cantidad de calor en el hilo conductor. Todo material que no sea superconductor ofrece resistencia al paso de la corriente, y es sabido que esa resistencia transforma parte de la energía eléctrica en calor; en uno de nuestros imanes pueden disiparse más de 10 millones de watts, suficientes para fundir cinco kilogramos de cobre en menos de un segundo.

Por su naturaleza, los mayores electroimanes abordan de distinto modo los problemas del calor y el esfuerzo. Se dividen en dos grandes categorías: los imanes CC (excitados por corriente continua, sin oscilaciones) y los imanes de pulsos (excitados por un breve impulso de corriente). Los imanes de pulsos, que pueden subdividirse en destructivos y no destructivos, pretenden evitar el excesivo calor limitando a menos de un segundo la duración del impulso de campo magnético. Los imanes destructivos están diseñados para un impulso único al cual nunca sobreviven, razón por la cual tampoco les afecta el problema del esfuerzo. Este impulso dura breves microsegundos, y a continuación una onda de choque mecánica, que avanza casi a la velocidad del sonido, destruye el imán.



3. FRAGMENTOS DE BOBINAS DE PRUEBA de seis capas con las que se ensayan nuevos conductores y analizan fallos de los electroimanes. Los dos fragmentos de la izquierda fueron cortados con sierra, y los otros dos desgajados violentamente por fuerzas magnéticas en un fallo catastrófico.

Por su elevado costo, los imanes CC de mayor potencia se concentran en un puñado de laboratorios de magnetismo de financiación estatal esparcidos por el mundo. La energía que consumen requiere subestaciones eléctricas que podrían alimentar ciudades enteras. Recorre los imanes una red de tuberías de refrigeración impresionante por donde circula agua desionizada y a elevada presión. El funcionamiento puede durar muchas horas, con un gasto de electricidad enorme. Recientemente el nuevo Laboratorio Nacional de Campos Magnéticos Elevados, en Tallahassee, alcanzó los 300.000 gauss, todo un récord para un electroimán CC tradicional (resistivo).

Temperatura y superconductividad

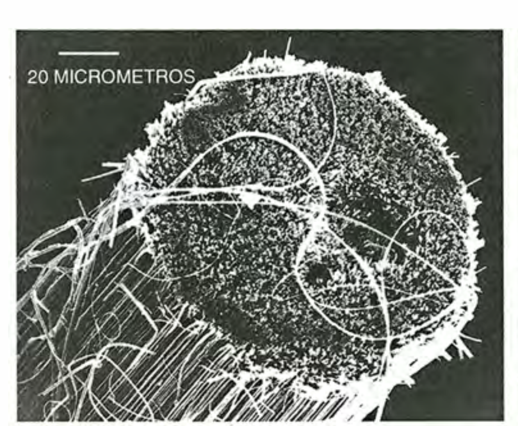
Los electroimanes superconductores evitan el calentamiento. Para mantener la superconductividad, se les suele hacer funcionar a una temperatura de 4,2 kelvins (–269 grados Celsius), conseguida por inmersión del imán en helio líquido. El inconveniente fundamental de estos imanes es que, cuando su campo sea suficientemente intenso, pugnará con la superconductividad de sus propias bobinas. Por tal motivo, los imanes superconductores hasta ahora se han limitado a unos 200.000 gauss.

En varios laboratorios, no obstante, se han combinado con imanes resistivos de CC en un diseño híbrido, alojándose el elemento resistivo dentro del gran elemento superconductor. Un imán híbrido del Laboratorio Nacional Magnético Francis Bitter en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) detenta el récord —385.000 gauss— para todos los tipos de imanes CC.

Aún más intensos son los campos magnéticos que generan los imanes de pulsos. Un diseño destructivo consiguió acercarse a los 10 millones de gauss con ayuda de fuertes explosivos, que confinaron de manera simétrica el campo magnético en un volumen sumamente pequeño en torno de la muestra (de modo muy parecido, la misma clase de implosión desencadena la primera reacción de fisión en una bomba atómica). Con este método, el aparato entero y la muestra se vaporizan, y mejor que esto ocurra en una zona remota. Quizá no deba sorprender que los dos laboratorios estatales especializados en tal diseño sean el Nacional de Los Alamos en Nuevo México y su oponente en Arzamas, Rusia.

Más cerca de un megagauss

La generación de campos magnéticos de pulsos que sean cada vez más intensos plantea cuestiones obvias. ¿Hasta qué valores podremos llegar? ¿Cuáles serán las limitaciones de los materiales? ¿Justifican las posibles mejoras nuevos desarrollos? Las respuestas dependen enteramente de la ciencia de materiales: cómo se comportan en cuanto a deformaciones y rotura final ante la tensión sufrida, cómo pueden reforzarse y de qué modo se relacionan sus propiedades mecánicas y eléctricas.





UNA MARAÑA de filamentos ultrafinos de niobio embutidos en cobre decuplica su resistencia.

Sometamos a estiramiento un hilo de cobre. Deberá romperse cuando la tensión del hilo supere al producto de la fuerza de enlace de un átomo individual por el número de enlaces en la unidad de superficie. El resultado del cálculo, para el caso del cobre, es una resistencia teórica de casi 25.000 kilogramos por centímetro cuadrado. Se sabe, sin embargo, que el cobre se deforma y se rompe a tensiones mucho menores. De hecho, los metales puros suelen empezar a deformarse bajo cargas menores del 1 % de su resistencia teórica.

¿Cómo se explica tan extraño comportamiento? Con una sola palabra: dislocaciones. Descubiertas hace unos sesenta años, las dislocaciones son largas retículas o hileras de defectos en las que los átomos no están dispuestos del modo perfecto y ordenado que presentan en el resto de la estructura cristalina. La deformación plástica de todos los sólidos cristalinos, metales incluidos, está ligada al movimiento de estas dislocaciones a través de la retícula. Adviértase que no necesitan romperse a la vez todos los enlaces atómicos de un plano para que se produzca un movimiento de dislocación. Como resultado del mismo, el material puede deformarse por rotura y recomposición de una sola hilera de enlaces atómicos a lo largo de la línea de dislocación, la cual se irá trasladando por un proceso análogo al de propagación de una ondulación de un borde a otro de una pesada alfombra. Esta clase de deformación requiere mucha menos energía que la cizalladura de un cristal exento de dislocaciones.

Para aumentar la resistencia mecánica de los materiales cristalinos se ha recurrido con éxito mayor a impedir el movimiento de las dislocaciones, introduciendo defectos inmóviles en la red cristalina. Esto puede hacerse de diversas maneras: mezclando un segundo elemento para formar una aleación, introduciendo precipitados tales como pequeñas partículas de óxido de aluminio o de óxido de berilio, o incluso generando una maraña de dislocaciones cuyos movimientos se entorpezcan mutuamente. En general, la resistencia se verá más reforzada cuanto mayor sea la densidad de los obstáculos.

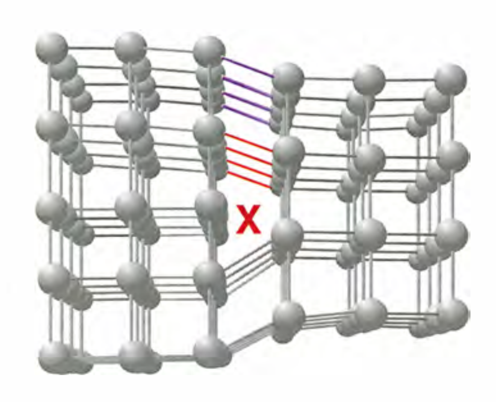
Por desgracia para nuestros fines, la mayor densidad de estos obstáculos entorpece, no sólo el movimiento de las dislocaciones, sino también el de los electrones, haciendo que éstos se dispersen y conduzcan peor la electricidad. Una gran densidad de defectos inhibe asimismo la ductilidad, que exige apreciables movimientos de las dislocaciones. En general, pues, al ganar en resistencia mecánica se pierde en conductividad y ductilidad.

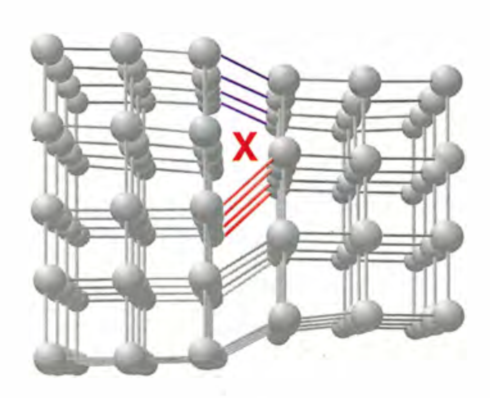
Hace ya tiempo, se comprobó que un material débil, así la epoxia, puede reforzarse incrustando filamentos duros (fibras de vidrio, grafito o boro) para formar un material compuesto al que dichos filamentos confieren resistencia. En los últimos años ha aparecido una nueva familia de materiales compuestos de alta resistencia, formados "in situ", los cuales presentan filamentos mucho más finos y estrechamente agrupados. Son diminutas cintas de grosor inferior a la millonésima de centímetro (5000 veces más delgadas que un cabello humano). Al hacerse sumamente difícil el movimiento de dislocación con filamentos tan finos, el material se va aproximando a su máxima resistencia teórica. De hecho, estos nuevos compuestos pueden ser incluso más resistentes que sus filamentos de refuerzo. Además, con un porcentaje de filamentos relativamente reducido se logra un espectacular aumento de resistencia. Por ejemplo, en el conductor de cobre-niobio, de extrema robustez, los filamentos de niobio ocupan sólo el 18 % del volumen; se mantiene así la alta conductividad, tan deseable, del cobre.

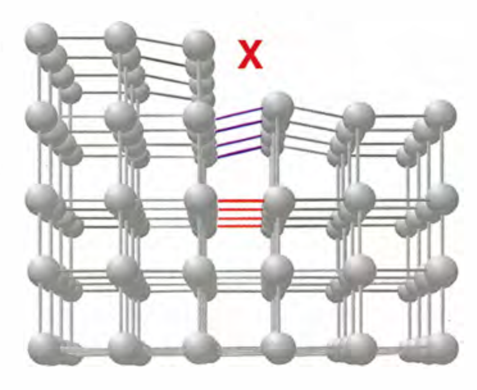
Variando el tamaño y la separación de los filamentos en el material se consigue una combinación óptima de resistencia, ductilidad y conductividad. Las muestras de prueba han soportado esfuerzos de casi 23.000 kilogramos por centímetro cuadrado: el doble de lo que resisten los hilos de cobre-niobio en nuestros experimentos. Estas mejoras en el comportamiento de los conductores permiten augurar la generación de campos cercanos al millón de gauss con imanes pulsados no destructivos.

Existe otro tipo de imán destructivo, desarrollado en el Laboratorio Megagauss de Tokio, el cual resulta particularmente conveniente porque la muestra raras veces sufre daños cuando el imán explota. De acuerdo con un diseño de elegante sencillez, la bobina es una sola espira de cobre, que genera un campo magnético de 1,5 millones de gauss en unos pocos microsegundos antes de estallar. Para proteger el aparato, el principal reto consiste en atrapar la metralla producida, de lo que se encarga una superficie de madera laminada convenientemente dispuesta.

Aunque en su funcionamiento normal sean menos espectaculares, los







LA DISLOCACION DE BORDES, indicada por la X en rojo, procede de un plano de átomos añadido en alguna parte del cristal. En la secuencia de la figura, la dislocación se traslada a través del material al deshacerse y rehacerse los enlaces químicos mostrados en rojo y púrpura. Finalmente toda la mitad izquierda del cristal se desplaza hacia arriba. Repetido el proceso millones de veces, conduce a un fallo mecánico: el cristal se parte en dos mitades.

imanes no destructivos presentan ventajas considerables. Permiten una gama de experimentos mucho más variada, puesto que la duración del impulso puede aumentarse hasta 10.000 veces, en un margen de 10 a 100 milisegundos. Ofrecen, además, un mayor control sobre la forma del impulso y una reducción de los intervalos entre impulsos, hasta tiempos del orden de 20 minutos. Todas estas características ayudan a determinar la integridad de los datos experimentales adquiridos durante el pulso. Finalmente, estos imanes a menudo implican una infraestructura de laboratorio más sencilla y menores costes de operación, accesibles ambos para un pequeño equipo de investigación. El precio a pagar por estas ventajas consiste en aguantar las enormes fuerzas tensoras que ejerce sobre el imán su propio campo.

Cómo aguantar la tensión

De diferentes modos puede diseñarse un electroimán para que sobreviva a las sacudidas de los impulsos. En nuestro método se combinan cuidadosamente diferentes tipos de hilo en el mismo imán. El conductor ideal para un electroimán debería poseer en alto grado resistencia, ductilidad y conductividad, pero por desgracia la resistencia a la tensión se logra siempre a expensas de la conductividad y la ductilidad. En vista de ello se han mezclado hilos de diferentes propiedades, adaptados a las condiciones que reinan en el interior del imán.

El devanado de nuestro electroimán consta de una bobina de 14 capas concéntricas, cada una de ellas formada por unas 30 espiras de hilo. La intensidad del campo magnético es máxima en el centro del imán y decrece más o menos linealmente a través de las 14 capas del imán. Por otra parte, las tensiones máximas se localizan en la cuarta capa a partir del centro, ya que la fuerza resulta ser proporcional al producto del campo magnético local, la densidad de corriente eléctrica del hilo y el radio de la capa en cuestión.

En el devanado se utilizan tres tipos diferentes de conductores, esencialmente de cobre. Para las capas intermedias, las que sufren mayor tensión, se ha elegido un hilo de cobre-niobio. Este conductor, el más resistente que existe, aguanta hasta casi 12.000 kilogramos por centímetro cuadrado, más que muchos aceros, en todo caso demasiado quebradizos y no suficientemente conductivos para esta aplicación. La resistencia de este hilo, utilizado por primera vez en el MIT, proviene de una densa distribución de microscópicos filamentos de niobio embutidos en el seno del cobre. Es muy interesante la manera en que estos filamentos confieren al cobre una resistencia mecánica tan notable [*véase el recuadro*].

En la primera capa, la fuerte curvatura de la pequeña bobina exige un material mucho más dúctil que el cobre-niobio, por lo que elegimos una mezcla de óxido cobre, níquel y berilio. Las siete capas más exteriores, de diámetro mayor, soportan las tensiones mínimas tanto al ser devanadas como al recibir el pulso eléctrico. Son asimismo predominantes en la resistencia eléctrica total, por la sencilla razón de que requieren mucha mayor longitud de hilo. Por ello se devanan con un hilo de un material más débil, el óxido de cobre y aluminio, que se encuentra en grandes cantidades, es más conductor y triplica la tenacidad del cobre ordinario.

Con esta disposición, las bobinas resisten una presión considerable. Para que los campos magnéticos sean de intensidad máxima, las bobinas del imán de pulsos deben distribuir el esfuerzo de un modo eficaz. Cuando estas fuerzas rebasan cierto límite, se produce una deformación permanente del material. Si el conductor sometido a tal esfuerzo posee la ductilidad suficiente, se "recostará" en la capa contigua buscando apoyo. Hemos incorporado esta capacidad en nuestros imanes con ayuda de un modelo de simulación desarrollado con Phil Snyder, de la Universidad de Princeton. Sin duda alguna, dejando aparte las cuestiones espinosas de ciencias de los materiales aquí implicadas, la acertada distribución de esfuerzos constituye el problema más arduo en el diseño, modelización y construcción de estos imanes gigantescos.

Nuestros colegas belgas del laboratorio de imanes de pulsos de Lovaina han adoptado otro enfoque. Utilizan un tipo de conductor único dentro un imán. Cada capa del conductor va reforzada mecánicamente por una gruesa capa de fuertes fibras de vidrio. Se separan así las dos funciones: la de generación del campo magnético y la de resistir las grandes tensiones mecánicas. Con imanes de este tipo se han alcanzado recientemente valores máximos de campo magnético equiparables a los nuestros.

También aquí hemos reforzado los imanes, pero solamente alrededor de la capa conductora más externa. El devanado entero de la bobina se apoya rígidamente en un lecho de cuentas de óxido de circonio diminutas (un milímetro de diámetro). Este material, versión de alta resistencia del muy conocido como imitación del dia-

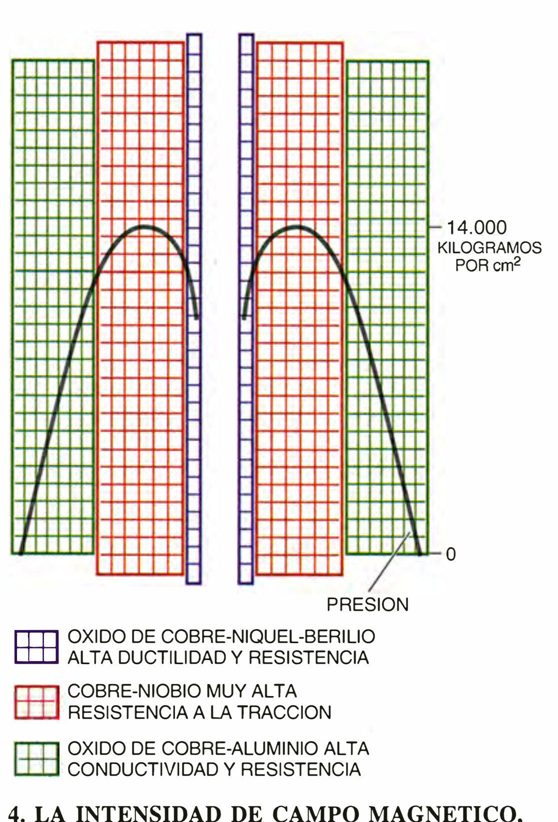
mante, figura entre los aislantes más sólidos que se conocen. Las cuentas van presurizadas dentro de una cámara de acero, ofreciendo un apoyo de rigidez suficiente para evitar que un fallo pequeño y localizado —tal como una sencilla rotura del hilo de la bobina— desencadene una serie de sucesos catastróficos. En muchos casos, basta con deshacer el devanado del imán para descubrir exactamente el lugar y la clase del fallo. Por supuesto, nuestra explosión del 3 de diciembre de 1992 fue la última de su género. Hoy los fallos suelen ser silenciosos y dejan intacto el equipo experimental en el centro del imán.

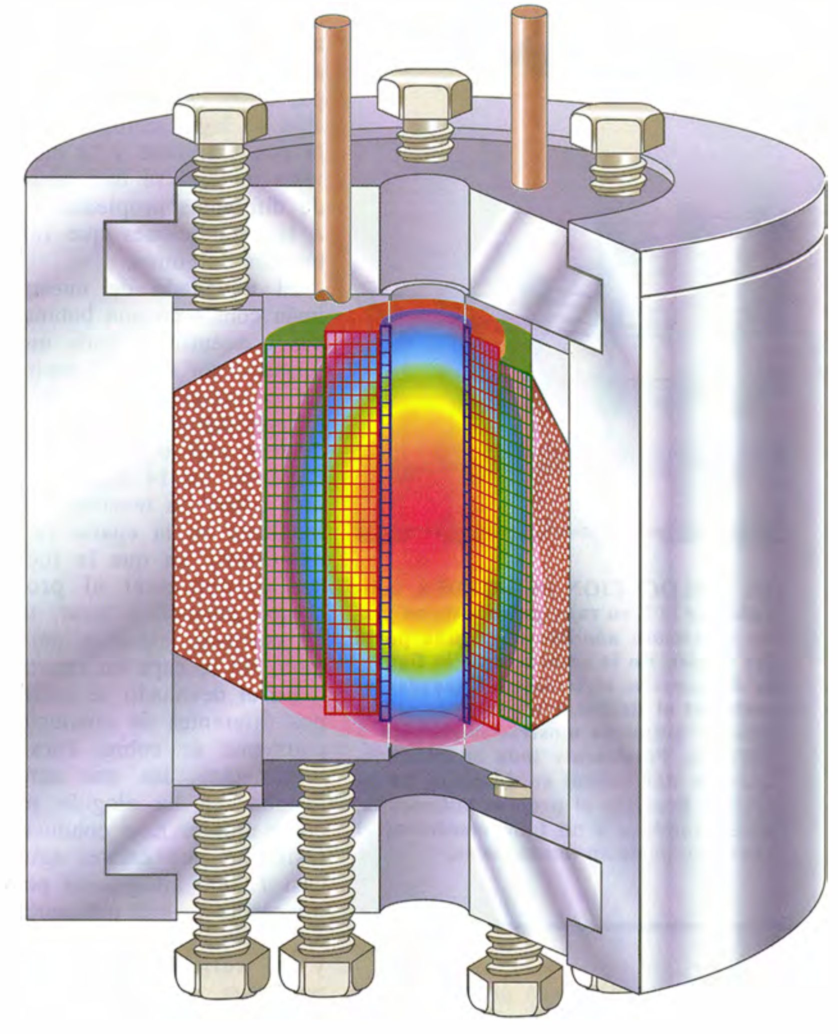
Lanzamiento del impulso

Pese a todos los refuerzos, el funcionamiento del imán de pulsos no destructivos es complicado. Antes de lanzar el impulso el imán se enfría hasta 77 kelvins por inmersión en nitrógeno líquido. Esta crítica operación aumenta alrededor del 15 % la resistencia a la tracción de los conductores, al tiempo que relaja su resistividad a la mitad o la cuarta parte. Al ser menor la resistividad, se pierde menos energía en calor. Pese a ello, la temperatura del imán se eleva unos 200 kelvins durante el impulso, alcanzando la temperatura ambiente al cabo de 0,01 segundos (si el imán recibiera el impulso a temperatura ambiente, la bobina entera se fundiría casi instantáneamente). Después del impulso, hay que esperar unos 20 minutos mientras el nitrógeno en ebullición se estabiliza y enfría el imán para recibir el pulso siguiente.

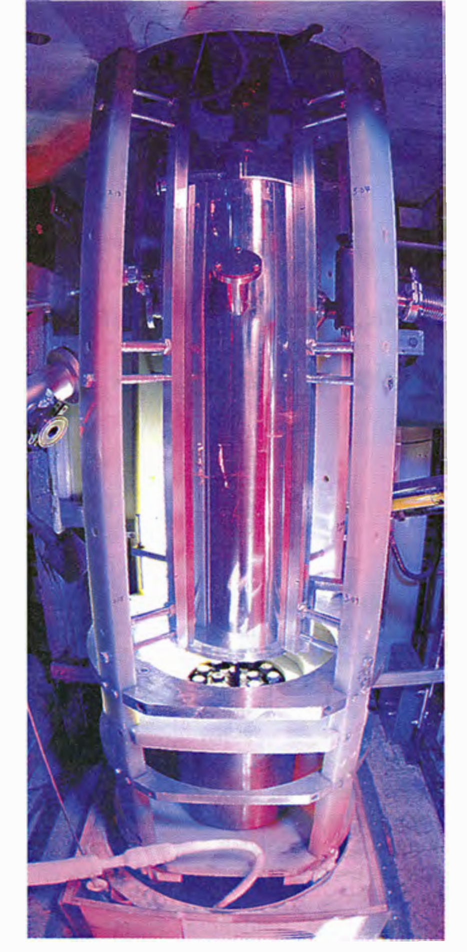
Probablemente antes de diez años se conseguirán pulsos de campo magnético no destructivos de un millón de gauss, por lo menos. Es difícil imaginar qué nuevos fenómenos físicos podrían entonces observarse, igual que en el pasado la obtención de campos magnéticos más intensos condujo a descubrimientos inesperados. La próxima revolución en imanes permanentes más potentes tendrá su raíz en los experimentos sobre materiales magnéticos. Quizá se confirme una inquietante predicción teórica, que escapa a la intuición: en ciertos materiales, la superconductividad destruida por un campo magnético intenso puede ser restablecida por campos magnéticos aún más elevados.

Por sí mismos, estos conductores más potentes, capaces de alcanzar un megagauss, encontrarían aplicaciones muy interesantes. Por ejemplo, mejorarían de modo radical el comportamiento de los reactores de fusión de plasma, dado que un campo magnético mayor intensifica grandemente la producción de potencia. También podría elevarse, con campos más intensos de pulsos, la velocidad de los proyectiles disparados por sistemas electromagnéticos. Esta técnica, desarrollada en los Laboratorios Naciona-





4. LA INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO, simbolizada en el arco iris (*derecha*), es máxima en la zona roja del centro de la bobina del electroimán, donde se colocan las muestras del experimento. Las secciones trapezoidales que rodean la bobina contienen pequeñas cuentas de óxido de circonio, que le dan apoyo y permiten la refrigeración por nitrógeno líquido. Por último, toda la estructura se encierra en una cámara de acero, y se presuriza apretando los pernos. El esfuerzo tensor sobre los hilos del imán (*representado sobre una sección transversal de la bobina*) es máximo en las capas intermedias de la bobina, en las que se utiliza el conductor de cobre-niobio (*en rojo*), más resistente.



5. LA ESTRUCTURA RIGIDA de soporte fija el electroimán —contenido en el cilindro de acero que puede verse abajo— y lo conecta a los condensadores situados en una cámara inferior. El largo y brillante cilindro que recorre casi toda la estructura es un depósito criogénico, que refrigera la muestra experimental y la conduce hacia el imán.

les de Sandia en Nuevo México, tal vez llegue a competir con los cohetes para el lanzamiento de satélites. Parece que ni siquiera el cielo pone límites a los campos magnéticos intensos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIDDEN ATTRACTION: THE HISTORY AND MYSTERY OF MAGNETISM. Gerrit L. Verschuur. Oxford University Press, 1993.

ARTIFICIAL ATOMS. Marc A. Kastner en *Physics Today*, vol. 46, n.º 1, págs. 24-31, enero de 1993.

RESISTENCIA DE LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA. David J. Bishop, Peter L. Gammel y David A. Huse en *Investigación y Ciencia*, n.º 199, págs. 18-25, abril de 1993.

PERMANENT MAGNET MATERIALS AND THEIR DESIGN. Peter Campbell, Cambridge University Press, 1994.

SEVENTY-TWO TESLA NON-DESTRUCTIVE PULSED MAGNETIC FIELDS AT AT&T BELL LABORATORIES. G. S. Boebinger, A. Passner y J. Bevk en *Physica B*, vol. 201, págs. 560-564, julio-agosto de 1994.

Infección por gusanos intestinales

Retrasa el crecimiento y el desarrollo intelectual de millones de niños. Aunque los investigadores no acaban de prestarle suficiente atención, los nuevos hallazgos abren posibilidades excelentes para el diseño de una vacuna

Peter J. Hotez y David I. Pritchard

Si toda la población que habita hoy en el planeta se sometiera ahora a un examen médico, se descubriría que alrededor de mil millones de personas —aproximadamente una quinta parte de la población mundial— llevan en su intestino delgado gusanos intestinales. Estos parásitos se afanan con tenacidad en una forma insidiosa de rapiña. Con sus dientes afilados, tales bandidos de poco más de un centímetro de longitud se aferran a las capas superficiales de la pared intestinal y chupan la sangre. Cada gusano de éstos succiona diariamente de la circulación el equivalente a una fracción de cucharadita de café. Cuantitativamente no parece mucho. Pero cuando 20, 100 o incluso un millar de estos vermes drenan sangre simultáneamente (en el último supuesto, hasta una taza de buen tamaño), las consecuencias pueden ser graves.

A través de la sangre llegan a los tejidos hierro, proteínas y otros nutrientes. Si el organismo es incapaz de reemplazar con suficiente rapidez las sustancias perdidas —problema habitual en niños, mujeres embarazadas y personas desnutridas— puede producirse una anemia ferropénica y un déficit proteico, signos característicos del paso de una infección benigna a una enfermedad en toda regla. Coincidentemente con la anemia y la desnutrición proteica, que tiene lugar hasta en un 25 por ciento de los individuos afectados, puede presentarse un estado letárgico profundo y debilidad extrema. Y lo que es aún más grave, cuando los niños padecen infección crónica de muchos gusanos, la carencia de hierro y de proteína puede provocar un serio retraso del crecimiento y alteraciones del comportamiento y de los sistemas motor y cognitivo, que a veces se tornan irreversibles. Ocasionalmente, la anquilostomiasis, enfermedad causada por estos gusanos, puede devenir letal, sobre todo para los niños.

Se dispone de un tratamiento eficaz contra la anquilostomiasis, dominante en los países subdesarrollados del trópico. Ocurre, sin embargo, que en muchos lugares donde esta enfermedad es común resulta difícil conseguir los fármacos parasiticidas y los suplementos de hierro. Por esta y otras razones se demanda con apremiante urgencia una vacuna que impida la instalación masiva de los gusanos en el intestino de la población. Pero la anquilostomiasis no ha recibido la atención que merece por parte de la comunidad científica en los últimos 25 años. La explicación es harto sencilla: la financiación de la investigación sobre enfermedades que afectan al Tercer Mundo es escasa, y mantener los gusanos en el laboratorio es tarea bastante onerosa. Todo ello ha contribuido a que el estudio de la infección intestinal por este tipo de gusanos no se haya beneficiado de la revolución biotecnológica que ha impulsado avances impresionantes en el conocmiento y tratamiento de otras enfermedades del hombre.

Nos proponemos cambiar esa tendencia. Nuestros laboratorios, junto con los de otros cuantos grupos más, han comenzado a aplicar modernos métodos moleculares a la exploración de los dos géneros principales: *Ancylostoma* y *Necator*. En los últimos años, este esfuerzo ha permitido identificar una gama de proteínas de estos gusanos que pueden servir potencialmente de vacunas preventivas. En un feliz e inesperado vuelco provocado por acontecimientos recientes, el interés por tales agentes infecciosos se ha visto incrementado, ya que muchas de estas proteínas parecen encerrar en su estructura una esperanzadora promesa para el tratamiento de alteraciones cardiovasculares e inmunitarias frecuentes en los países industrializados.

PETER J. HOTEZ y DAVID I. PRITCHARD vienen investigando, desde los comienzos de su carrera científica, los mecanismos moleculares de la infección por gusanos intestinales. Hotez, docente de pediatría y epidemiología, dirige el laboratorio de helmintología médica de la Universidad de Yale. Pritchard enseña biología en la Universidad de Nottingham, a la que se incorporó procedente de la industria farmacéutica.

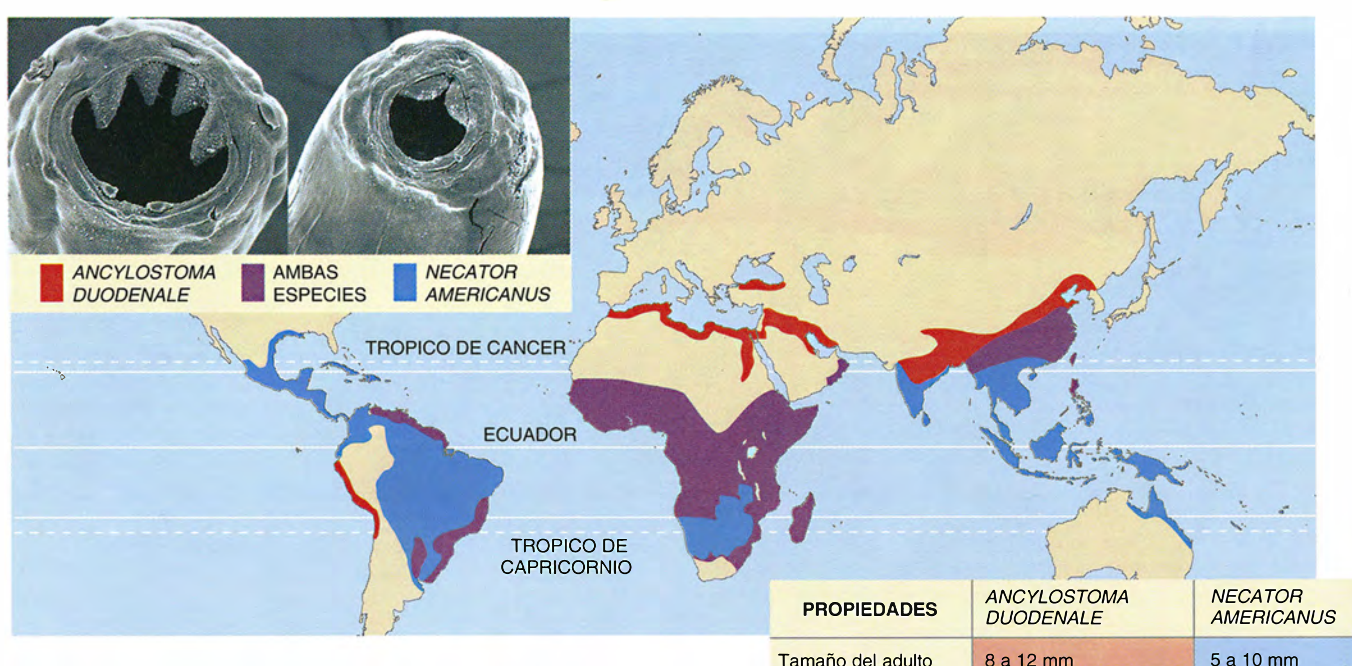
Una curiosa vía de infección

Hubo un tiempo en que los Estados Unidos y otros países colocaron la anquilostomiasis en un lugar destacado de la agenda de investigaciones prioritarias. La comunidad médica tomó conciencia de su potencial gravedad en 1880, cuando una epidemia de lo que se llamó anemia de los mineros azotó a los obreros italianos que construían el túnel de San Gotardo en los Alpes suizos. *Ancylostoma duodenale*, una de las dos especies que con más frecuencia causan esta enfermedad en el hombre, era entonces la culpable. Hacia 1902 se identificó también la segunda es-





1. LOS GUSANOS intestinales *Ancylostoma duodenale* (*derecha*) y *Necator americanus* (*izquierda*) son las especies más comunes que afectan al hombre. Para alimentarse, los gusanos se anclan en la pared del intestino delgado y succionan sangre de los capilares.



PROPIEDADES	*ANCYLOSTOMA DUODENALE*	*NECATOR AMERICANUS*
Tamaño del adulto (la hembra es un poco mayor que el macho)	8 a 12 mm	5 a 10 mm
Número de huevos que cada gusano produce diariamente	10.000 a 30.000	5000 a 10.000
Cantidad de sangre que succiona diariamente un gusano	0,04 cucharilla (cuanto mayor sea la cantidad mayor será la virulencia de la especie	0,004 cucharilla
Partes bucales	Dientes afilados	Placas cortantes
Vida media del adulto	1 año	3 a 5 años
Capacidad para producir infección si se ingiere	Sí	No
Capacidad de las larvas para mantenerse en estado latente en el organismo	Sí	No

2. EN LOS TROPICOS VIVEN la mayoría de los gusanos *A. duodenale* y *N. americanus* de todo el mundo *(mapa)*; los colores rojo y azul indican cuál es la especie predominante en una región determinada, aunque la otra especie pueda estar también presente en algunos puntos. Los rasgos típicos de los gusanos se recogen en la tabla. Considerados en su globalidad, estos agentes infecciosos succionan el equivalente de toda la sangre de millón y medio de personas cada día.

pecie, *Necator americanus*, y se conocieron bastantes pormenores del mecanismo del que se valen los gusanos para pasar de un individuo a otro. Poco después se vio que la infección por esta segunda especie se extendía de manera creciente por el sureste de los Estados Unidos. Ante esta situación, el magnate del petróleo John D. Rockefeller fundó la Comisión Sanitaria Rockefeller para erradicar la enfermedad en esas regiones meridionales. Sufragó también una campaña para controlar la infección de gusanos intestinales en otros países. Estos esfuerzos condujeron a la introducción de nuevos tratamientos y supusieron una base sólida para el progreso que tiene lugar en nuestros días.

Antes incluso de que Rockefeller se interesara por el tema, los investigadores se habían apuntado ya un descubrimiento fascinante: la vía de infección en el hombre recorre un circuito complejo en el que se requiere que huevos y larvas pasen cierto tiempo en el suelo, fuera del hombre. Cada día, la hembra adulta del gusano pone miles de huevos fecundados que expulsa el organismo humano con las heces. Para sobrevivir y crecer, las larvas emergentes necesitan calor, humedad y un suelo bien aireado, protegido de la luz solar. Estas condiciones se dan con mayor frecuencia en áreas rurales de los trópicos, especialmente allí donde las cosechas proporcionan umbría, o los cultivos se realizan bajo árboles más altos. De ahí que la mayoría de las infecciones (en las que participan 100 o más gusanos) se producen en personas que viven donde crecen cocoteros, moreras, cafetales, té, caña de azúcar o remolacha.

Al día siguiente de la deposición de los huevos en el suelo, emergen las larvas microscópicas, que se alimentan de restos de materia orgánica y bacterias antes de haber hecho dos mudas previas al estadio infectivo. Las larvas infectivas no comen. Pero sí se encaraman hasta la zona más superficial del suelo para así poder establecer contacto con el hospedador. En este intento pueden exhibir lo que se llama comportamiento de búsqueda: trepan por una hoja de hierba o remontan un terrón, y apoyándose sobre la cola se agitan.

Las larvas, apenas visibles, se infiltran en el organismo labrando túneles a través de la piel de las piernas o los pies. La ingestión oral de larvas de *A. duodenale* puede desencadenar también una infección. El desplazamiento a través de la piel induce una respuesta inflamatoria, aparentemente ineficaz, en la que los leucocitos se acumulan en el tejido afectado. Se desconoce la razón por la que las células no eliminan los gusanos. Mientras tanto, la inflamación puede provocar un prurito intenso. Recuérdese, a este propósito, el estallido de "prurito del suelo", así se ha denominado a la reacción, que aconteció en el norte de la India en 1978: lo sufrió un grupo de varones que habían participado en un juego de *kabaddi*, donde se trata de derribar al oponente y tumbarlo en el suelo. Lo que éstos ignoraban era que el terreno embarrado estaba contaminado con larvas infecciosas de gusanos intestinales; les sobrevinieron unos picores horribles por todo el cuerpo, que les obligó a correr desesperadamente en busca de alivio.

Algunos investigadores sospechan

que el paso hasta el intestino delgado no ofrece dificultad alguna para las larvas una vez ingeridas; pueden emigrar directamente hasta su destino final. Las larvas que penetran en el organismo a través de la piel deben taladrar, sin embargo, la epidermis, abrirse camino hasta la dermis y llegar hasta los capilares sanguíneos o los vasos linfáticos. Operada esta penetración, se desplazan por la circulación venosa hasta el corazón derecho y desde allí a los pulmones. Salen entonces de la circulación y entran en las vías respiratorias; provocan golpes de tos y se tragan. En el intestino delgado, las larvas, que quizá comenzaron a madurar en la piel, concluyen su desarrollo y alcanzan el estado adulto de macho o hembra. Se aparean y se alimentan. Las hembras ponen ya los primeros huevos unos dos meses después de haber invadido, en fase larvaria, el organismo.

Curiosamente, este ciclo continuo se interrumpe a veces a mitad de camino. Gerhard A. Schad y sus colaboradores, de la Universidad de Pennsylvania, han demostrado que las larvas de *A. duodenale* pueden permanecer en estado letárgico dentro del organismo durante meses antes de alcanzar el intestino. Nadie sabe exactamente dónde se aposentan ni cómo llegan a su escondrijo, aunque Keun Tae Lee, Maurice Dale Little y Paul C. Beaver, de la Universidad de Tulane, han reseñado la presencia de larvas de estos gusanos en fibras musculares de animales y del hombre. De donde se desprende que el tejido muscular pueda ser un repositorio de larvas en estado de latencia.

Eficacia de la latencia

Desde el punto de vista del gusano, el paso a un estado de latencia significa asegurar la supervivencia. Si las larvas maduran prematuramente durante la estación seca del año, las hembras corren el peligro de depositar los huevos en suelo inhóspito. Pero si las larvas pueden programar su llegada al intestino, de suerte que la producción de huevos coincida con la estación húmeda, los huevos contarían con mayores probabilidades de prosperar. Parece que las larvas poseen esa capacidad. El grupo de Schad, durante su trabajo en la región de Bengala Occidental, a finales de los años sesenta, descubrió que las larvas de *A. duodenale* interrumpen su desarrollo en los tejidos durante los meses calurosos y secos del año, para reanudar su avance hacia el estado de adulto y así hacer coincidir la puesta en el umbral de la estación de los monzones. Por consiguiente, los huevos se depositan, en el momento preciso, en suelo húmedo.

El período de latencia, ventajoso para los gusanos, resulta nefasto para el hospedador. Las larvas pueden resistir la acción de los fármacos que eliminan el gusano en su estado adulto, ya instalado en el intestino. Así pues, pacientes que reciben el tratamiento con manifiesto éxito, pueden enfermar de nuevo meses después, incluso a pesar de haber evitado nuevos contagios.

No menos inquieta un dato circunstancial: las larvas de *A. duodenale* en estado letárgico pueden penetrar en la leche de la madre y provocar una grave infección en el recién nacido. Esta sospecha se funda en lo observado en experimentos llevados a cabo con perros. Además, Yu Sen-hai y Shen Wei-xia, del Instituto de Enfermedades Parasitarias de Shangai, acaban de identificar muchos recién nacidos con infecciones graves de *A. duodenale.* La posibilidad de transmisión a través de la leche materna es especialmente preocupante, porque el recién nacido con una infección grave puede morir por la pérdida de sangre concomitante.

Conocido el ciclo vital de los gusanos intestinales, los autores se aprestaron, por separado, a identificar las moléculas que les permiten labrar túneles a través de la piel, madurar y sobrevivir en el interior del organismo. Si conseguíamos aislar esas moléculas, pensábamos, podríamos incorporar algunas de ellas a la lista de las vacunas. Hotez se centró en el género *Ancylostoma*, que incluía varias especies; Pritchard, por su parte, abordó *Necator*, en particular *N. americanus.* Hotez ha trabajado fundamentalmente con *A. caninum* por tratarse de una especie de *Ancylostoma* más fácil de mantener en el laboratorio que *A. duodenale.* Como cabe adivinar por el propio nombre, *A. caninum* infecta primariamente al perro; también puede afectar al hombre, según han demostrado Paul Prociv, de la Universidad de Queensland, y John Croese, del Hospital General de Townsville.

¿Por qué nos interesaba ante todo la elaboración de vacunas? Lo hemos dicho. El acceso al tratamiento resulta problemático en muchas regiones del mundo; además, las larvas latentes pueden generar nuevas infecciones meses después de haber completado el tratamiento. Estas dificultades se complicaban con un fenómeno adicional: las personas afectadas por una infección inicial con el gusano intestinal no adquieren, por lo que se ve, la inmunidad protectora intensa contra infecciones ulteriores que beneficia a personas que una vez padecieron, por ejemplo, la varicela. Por consiguiente, las personas que viven en áreas donde proliferan los gusanos intestinales estarán expuestas de modo permanente y se reinfectarán y necesitarán tratamientos

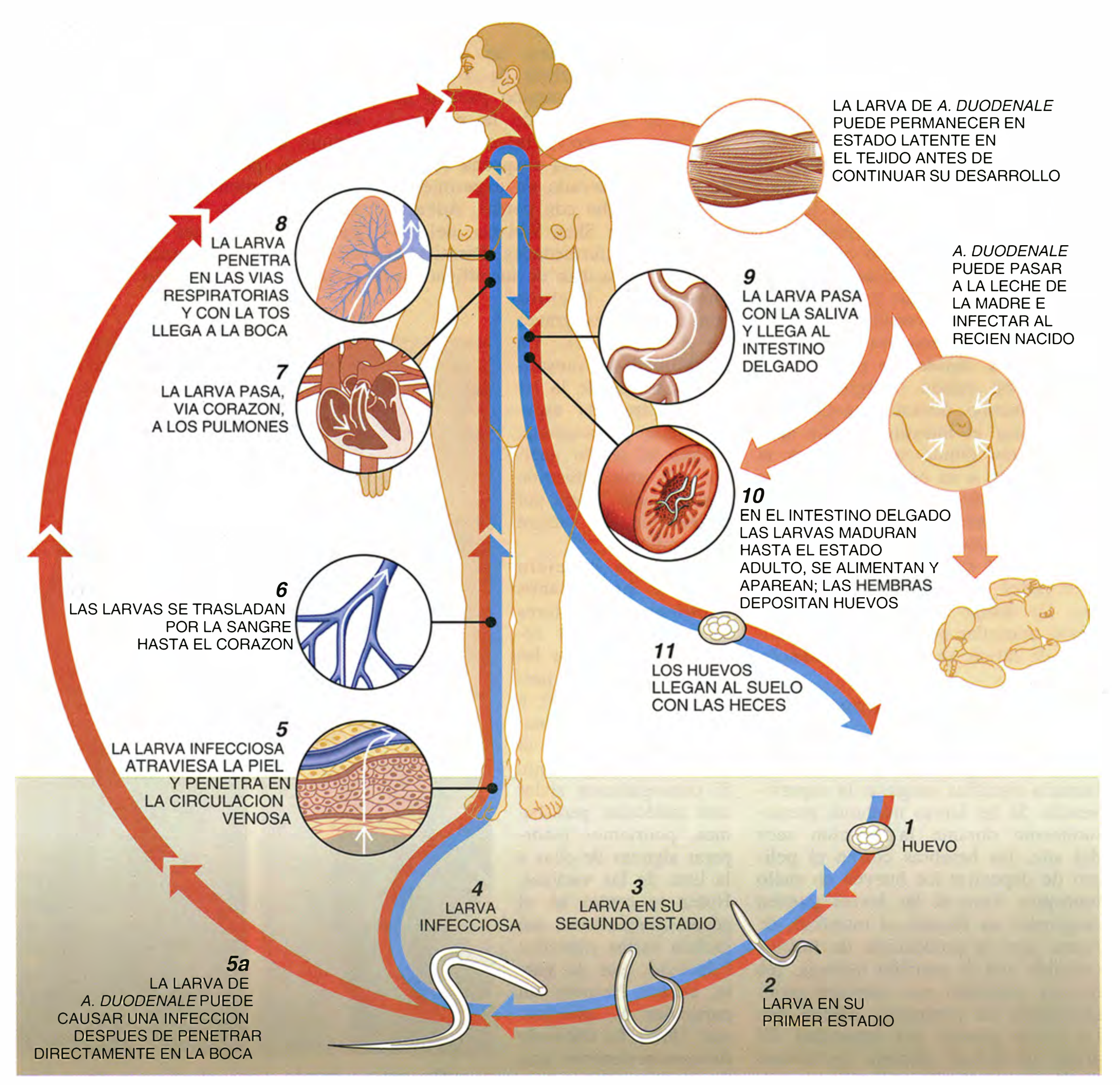



3. NIÑO DE LA INDIA cuyos datos se recogen en un informe de la Comisión Sanitaria de la Fundación Rockefeller fechado en 1919. Enflaquecido y debilitado por la enfermedad antes del tratamiento *(izquierda)*, ganó peso y masa muscular después del tratamiento para eliminar los parásitos de su intestino *(derecha)*. Por desgracia, ciertos efectos potenciales de la infección crónica, como es el deterioro de la función intelectual, son a menudo irreversibles, y la reinfección es frecuente.

repetidos con los fármacos adecuados: algo imposible para la mayoría de las víctimas. Además, el uso frecuente de fármacos no es la solución ideal para el problema del gusano intestinal. Los investigadores del Instituto de Enfermedades Parasitarias de Shangai, que han estudiado muchos pacientes, aseguran que las medicaciones no revelan la eficacia que en un principio cabía esperar.

El mejor enfoque para la prevención, por tanto, estriba en la introducción de mejoras sanitarias y en conseguir evitar a toda costa la transmisión. A este tipo de medidas se cree que se debe en parte la erradicación de la enfermedad del gusano intestinal en el sureste de los Estados Unidos. Sin embargo, es improbable que estos sistemas sanitarios puedan introducirse en un futuro próximo en la mayoría de los países subdesarrollados. Y tampoco parece probable que la gente que vive en los trópicos esté dispuesta a llevar siempre el vestido protector con la esperanza de reducir la exposición. Por el momento, la alternativa más lógica yace en la administración amplia de una vacuna que redoble las defensas del huésped.

Podemos imaginar dos tipos diferentes de vacunas. Con el enfoque antiinfeccioso clásico, se administran moléculas u organismos enteros muertos o defectuosos para provocar una respuesta inmunitaria dirigida contra una o varias moléculas



4. TRAMOS DEL CICLO BIOLOGICO de *A. duodenale (flechas rojas)* y *N. americanus (flechas azules)* son semejantes. Puede decirse que los ciclos comienzan con el desarrollo inicial de la larva en el suelo (*1-4*). Las larvas infectivas penetran de ordinario en el organismo a través de la piel (*5*) y siguen una ruta tortuosa hasta llegar al intestino delgado (*6-9*). Allí maduran hasta el estado adulto, se aparean para producir huevos fecundados que se transportan con las heces hasta el suelo (*10-11*). Las larvas de *A. duodenale* pueden también provocar la infección en el intestino delgado después de entrar en el organismo por vía oral (*5a*). Algunos datos sugieren que las larvas de *A. duodenale* pueden escoger otros atajos inquietantes (*flechas de color rojo débil a la derecha*). Pueden permanecer en estado de latencia en el tejidos muscular antes de dirigirse al intestino; asimismo, pueden penetrar en la glándula mamaria de la mujer gestante y pasar con la leche al recién nacido.

presentes en la superficie del organismo infeccioso. Cuando se consigue tener éxito con ese enfoque, la inducción de la respuesta capacita al organismo humano para eliminar el agente patógeno en cuanto invade el organismo.

Aun cuando la infección natural del gusano intestinal no parece inducir una inmunidad protectora intensa, la vacunación podría conferir protección. Hace más de treinta años, Thomas A. Miller, entonces en la Universidad de Glasgow, indujo inmunidad en perros al inocularlos con larvas de *A. caninum* en la etapa infectiva, alteradas por irradiación. Una vacuna humana constituida por larvas vivas no conseguiría con toda probabilidad la aprobación gubernamental. Sin embargo, el éxito de Miller podría reproducirse en el hombre mediante la administración de proteínas de larvas manipuladas genéticamente o de fragmentos proteicos. Si esa vacuna resultara eficaz, se conseguiría evitar que las larvas sobrevivieran o madurasen en el organismo humano.

Estamos explorando también nuevos tipos de vacunas, a las que denominamos vacunas antienfermedad. Puesto que los gusanos intestinales no se multiplican en el huésped, todo lo que reduzca la cantidad de sangre que puedan extraer limitaría el daño que causan. Sospechamos que, si podemos identificar las moléculas que segregan los gusanos intestinales y no sintetiza el organismo humano, la administración de estas moléculas podría hacer que se disparase una respuesta inmunitaria contra ellas. Aunque la respuesta no destruyera el gusano directamente (porque las sustancias liberadas se difunden desde el parásito), podría neutralizar las secreciones que permiten a éste madurar y succionar sangre o evadir el ataque por otros mecanismos del sistema inmunitario.

En ese empeño por identificar moléculas que pudieran constituir vacunas idóneas, hemos examinado los procesos bioquímicos que se desarrollan tras el anclaje del gusano en la pared intestinal. Una vez que se ha adherido, el parásito adapta los músculos de su faringe para la succión a través de la membrana mucosa y material subyacente. Al mismo tiempo, segrega enzimas poderosas que disgregan el tejido.

Algunas de estas enzimas se han identificado ya en nuestros laboratorios y en el de Paul J. Brindley, del Instituto de Investigaciones Médicas de Queensland. Hay proteasas, que degradan las proteínas del huésped, y una hialuronidasa, sustancia que descompone el ácido hialurónico y otros constituyentes estructurales del intestino. Con este doble asalto, mecánico y químico, se liberan no sólo componentes potencialmente nutritivos para la pared del gusano, sino que también se rompen los capilares en el punto de adhesión. El gusano engulle buena parte de la sangre liberada, aunque otra parte se desperdicia.



5. *A. CEYLANICUM* infecta a individuos en algunas zonas de Asia. La especie está menos extendida en el resto del mundo que *A. duodenale* y *N. americanus*.

Ante esta invasión, el organismo humano responde mediante una defensa en dos campos. Parte de la defensa se orienta a coagular la sangre en el sitio donde se ha producido el daño vascular. La coagulación evita pérdidas ulteriores e inhibe la nutrición del gusano. La otra parte de la defensa es inmunitaria. Participa en ésta la activación de los leucocitos, incluidos los neutrófilos y eosinófilos. Los leucocitos intentan destruir los parásitos mediante la generación de radicales libres e hidroxiperóxidos, ambos muy reactivos y eficaces.

La defensa inmunitaria implica también la liberación de moléculas de anticuerpos, que pueden actuar de forma concertada con los leucocitos. Entre los anticuerpos se cuentan los del tipo de la inmunoglobulina E (IgE) —precisamente los que participan en las respuestas alérgicas. De acuerdo con estudios recientes acometidos por Pritchard y sus colaboradores en Papúa Nueva Guinea, las reacciones mediadas por IgE adquieren notable intensidad en algunos pacientes (posiblemente en los más predispuestos a las alergias) y parecen disminuir la alimentación de los gusanos; sin embargo, no hay constancia de una súbita y generalizada aniquilación de gusanos.

Los gusanos como laboratorios químicos

Los gusanos persisten porque la evolución les ha dotado de mecanismos con los que burlar las defensas vasculares e inmunitarias. En este contexto, los parásitos entorpecen la labor de al menos dos componentes del proceso de formación del coágulo. Cuando se altera un capilar, las células vasculares liberan una glicoproteína, el factor tisular, que se combina con una proteína circulante, el factor VII. El complejo resultante pone en marcha una cascada de procesos que culmina con la activación de una tercera molécula —una enzima, el factor X. El factor X activado (conocido como factor Xa), a su vez, convierte la proteína protrombina en la enzima trombina, que convierte otra proteína, el fibrinógeno, en fibras insolubles de fibrina. La fibrina se acumula entonces, a modo de red, sobre la pared del vaso y constituye la esencia del coágulo. Esta red atrapa plaquetas y otras sustancias.

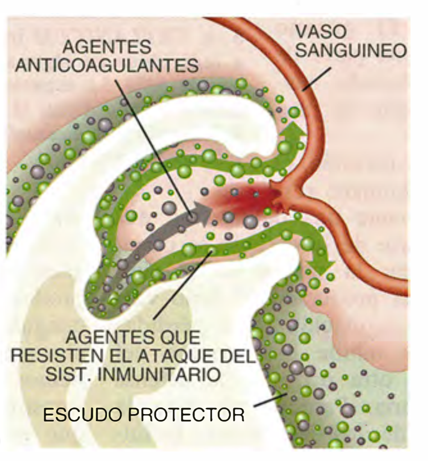
Desde hace más de un siglo se sabe que los gusanos intestinales producen al menos un agente anticoagulante. Su naturaleza constituía, sin embargo, un misterio. Nosotros hemos averiguado que los gusanos intestinales producen una sustancia que evita la agregación de las plaquetas en el tubo de ensayo. Con otros investigadores hemos establecido, además, que los gusanos segregan una proteína que opera en una fase temprana de la vía de formación del coágulo e inhibe la actividad del factor Xa; impide, por tanto, todos los pasos posteriores de esa vía. Esa proteína ha sido aislada del *A. caninum* por Michael Cappello en el laboratorio de Hotez, en colaboración con George P. Vlasuk, de CORVAS International en San Diego. La molécula, denominada AcAP (péptido anticoagulante de *A. caninum*), es una proteína algo pequeña, de gran potencia, cuya presencia no se había detectado antes en la naturaleza; posee propiedades que, como se verá, la convierten en fármaco útil en el tratamiento de enfermedades no relacionadas con la infección por gusanos intestinales.

La estrategia del gusano intestinal para evadir la destrucción inmunitaria depende, de manera análoga, de la liberación de sustancias químicas. Los investigadores de CORVAS han aislado del gusano intestinal del perro una de esas sustancias, el factor inhibidor de neutrófilos. Bloquea la actividad de neutrófilos y eosinófilos, al impedir en parte que liberen sustancias químicas muy oxidantes.

Pritchard y su colaborador Peter M. Brophy han demostrado que *N. americanus* ha conseguido, en el curso de la evolución, una capacidad defensiva similar. Segrega enzimas antioxidantes (como la superóxido dismutasa y la glutatión-S-transfera-

6. EL GUSANO ADULTO albergado en el intestino delgado *(micrografía y detalle)* succiona la sangre de las capas superficiales de la pared intestinal y destruye los tejidos de los vasos para nutrirse. Se asegura así un suministro continuo de sangre y se protege del sistema inmunitario mediante la secreción de un conjunto de sustancias *(esferas en el detalle)*, algunas de las cuales aparecen listadas en la tabla. Las secreciones de la larva y del gusano adulto podrían servir como vacunas para prevenir la enfermedad que estos gusanos causan o como tratamientos de enfermedades cardiovasculares y trastornos del sistema inmunitario. El gusano de la micrografía se encontró en la autopsia de un niño, víctima de una infección por gusanos intestinales que no se había diagnosticado.





	SUBSTANCIA	FUNCION
SUBST. QUE INHIBEN LA COAGULACION DE LA SANGRE	Péptido anticoagulante (en *Ancylostoma*)	Inhibe la actividad de una enzima clave de la coagulacion de la sangre
	Inhibidor de la agregación plaquetaria (en *Ancylostoma, Necator*)	Impide que las plaquetas faciliten la formación del coágulo
SUBSTANCIAS QUE OBVIAN EL ATAQUE INMUNITARIO	Superóxido dismutasa (en *Necator*)	Antioxidante; neutraliza los agentes oxidantes destructivos, segregados por células inmunitarias
	Glutatión-*S*-transferasa (en *Necator*)	Antioxidante
	Enzima que degrada anticuerpos (en *Necator*)	Impide que los anticuerpos participen en la respuesta inmunitaria
	Acetilcolinesterasa (en *Necator*)	Degrada la acetilcolina, que puede inducir un ataque de las células inmunitarias sobre los gusanos intestinales
	Factor inhibidor de neutrófilos (en *Ancylostoma*)	Impide que las células del sistema inmunitario segreguen agentes oxidantes
	Hialuronidasa (en *Ancylostoma*)	Facilita la difusión local de otras secreciones del gusano intestinal

sa), que neutralizan radicales libres y sustancias de parejo tenor. Como protección añadida, *N. americanus* sintetiza una enzima que degrada la acetilcolina, neurotransmisor éste que emiten las neuronas de la pared intestinal. Si el neurotransmisor actuase libremente, contribuiría a activar los leucocitos frente al parásito.

Por último, hemos sabido que las sustancias utilizadas para destruir el tejido en el bocado de ingesta le protegen también frente al ataque inmunitario. Una de las proteasas fabricadas por *N. americanus* disuelve anticuerpos, y la hialuronidasa, sintetizada fundamentalmente por las especies del género *Ancylostoma*, promueve la diseminación local de diversas secreciones. Esta difusión asegura que los gusanos intestinales se ciñan de un escudo quimioprotector.

En muchos aspectos, el gusano adulto instalado en el intestino funciona como una fábrica de productos farmacéuticos autosuficiente, diseñada para la elaboración de moléculas que inhiben la coagulación de la sangre y las respuestas inmunitarias del huésped. El gusano adulto, sin embargo, no es el único capaz de producir sustancias químicas de interés; también lo hacen las larvas. John M. Hawdon, del laboratorio de Hotez, ha demostrado, por ejemplo, que las larvas infectivas de *A. caninum* elaboran al menos dos proteínas: una proteasa, que presumiblemente ayuda a los organismos a taladrar la piel, y otra proteína de función desconocida. Esta segunda proteína, denominada ASP (polipéptido segregado por *Ancylostoma*), puede participar en la maduración hacia el estado adulto.

Muchos candidatos de vacunas

El descubrimiento de que muchos gusanos intestinales segregan proteínas durante su ciclo biológico aporta un filón de ideas para el diseño de vacunas. En ese sentido, Hawdon y Brian Jones, del grupo de Hotez, han clonado recientemente el gen de la ASP y determinado la secuencia aminoacídica de la proteína que codifica. Una parte de la proteína ha resultado ser muy semejante a un segmento de la proteína que se encuentra en el veneno de ciertos insectos. Este veneno proteico provoca una decidida respuesta por parte del sistema inmunitario del hombre. Más aún, los anticuerpos que responden a ese veneno responden también al ASP cuando se mezclan con él en el tubo de ensayo.

Nos avalan esos resultados para pensar en el ASP como posible vacuna capaz de desencadenar una respuesta de anticuerpos dirigidos contra las larvas infectivas del gusano, provocando su destrucción o impidiendo, al menos, su maduración. La ingeniería genética nos faculta ahora para producirlo en grandes cantidades. Equipado con este suministro, Hotez iniciará con investigadores del Instituto de Enfermedades Parasitarias de Shangai los primeros ensayos para probarla como vacuna en animales de experimentación. Los otros productos fabricados por el gusano y que se han mencionado anteriormente —en especial el AcAP y otros factores anticoagulantes, los antioxidantes y el factor inhibidor de neutrófilos— entran también en la consideración de posibles vacunas.

Los estudios de Edward A. Munn y sus colaboradores, del Instituto Babraham, tienen en su punto de mira otra molécula que merece ulterior evaluación. Han demostrado que una vacuna constituida por una enzima fabricada por un gusano estomacal (no intestinal) de la oveja protege a este animal de la reinfección con el parásito. Pritchard y sus colaboradores han demostrado que *N. americanus* sintetiza una enzima semejante, lo que sugiere que la inyección de la enzima del gusano podría provo-

car una respuesta protectora frente a la infección por gusano intestinal en el hombre.

Otras vacunas podrían emerger también de las investigaciones que se centran en determinantes genéticos de susceptibilidad a la infección por el gusano intestinal. Hace varios años, Schad y Roy M. Anderson observaron que las personas que adquieren una primera infección grave parecen readquirir infecciones graves, mientras que los individuos que se afectan levemente readquieren también infecciones leves. Existen datos que parecen indicar que estos patrones están controlados por genes del huésped. Si eso es así, la identificación de los genes que influyen sobre la susceptibilidad proporcionarían claves adicionales para evitar infecciones graves. Del trabajo de Pritchard en Papúa Nueva Guinea se desprende el interés de someter a estudio los genes implicados en la alergia.

Algunas de estas perspectivas son bastante esperanzadoras, pero sigue existiendo un serio obstáculo que frena la elaboración de vacunas. Las compañías farmacéuticas se resisten a invertir en vacunas para el Tercer Mundo porque carecen de un mercado lucrativo que asegure recuperar las inversiones.

Resulta un tanto irónico que las proteínas identificadas hasta ahora sean precisamente las que pueden ser útiles, no como vacunas, sino como base de tratamiento de afecciones sin relación con la infección por gusanos. A modo de botón de muestra, el agente anticoagulante AcAP podría demostrar su eficacia en el tratamiento de enfermedades cardiacas.

Recuérdese que la AcAP bloquea la actividad del factor Xa, un componente clave en la cascada que conduce a la coagulación de la sangre en el intestino. El factor Xa también parece intervenir en la formación de los coágulos que causan un infarto de miocardio. Estos datos, combinados con la peculiaridad de la estructura del AcAP, inducen a pensar en el uso de esta proteína como opción alternativa de los fármacos anticoagulantes disponibles para el tratamiento de pacientes con enfermedad cardiovascular. El AcAP podría ser beneficioso, por ejemplo, para prevenir la formación de nuevos coágulos en las arterias distendidas por angioplastia (la expansión de un pequeño globo en una arteria con el objetivo de abrir cauce para el flujo sanguíneo).

El factor inhibidor de los neutrófilos y otros agentes bloqueantes del sistema inmunitario despiertan esperanzas por lo que se refiere al tratamiento de enfermedades habituales en los países industrializados. Hay en marcha algunos estudios para determinar el valor de estas sustancias en terapias de enfermedades autoinmunitarias, rechazo de trasplantes, asma y otras alergias.

Es grato pensar que las moléculas encontradas en los gusanos intestinales puedan tener aplicaciones, aunque las aplicaciones terapéuticas no sean nuestra primera prioridad. Nos sigue moviendo la esperanza de que lleguemos a encontrar una vía para erradicar la enfermedad vinculada a estos gusanos.

En 1911 C. L. Pridgen, médico del condado de Columbus, describió la situación angustiosa de un adolescente de 15 años afectado por esta enfermedad. Así anotaba en el segundo informe anual de la Comisión Sanitaria Rockefeller:

"El muchacho representa un paciente prototípico. Su piel tiene un aspecto cadavérico... Parecía estar ajeno a la gente que le rodeaba... y él mismo se sometió al examen médico con absoluta indiferencia. Una vez terminado el examen se volvió, y sin esperar a escuchar el diagnóstico, se sentó en un tronco cercano con signos de profunda fatiga... [El padre] dijo que nunca servía para nada...y que podía pasarse días y días apático, tumbado en el porche como un perro. No había manera de despertarle para que trabajara o se divirtiera."

Con el tratamiento este joven experimentó una enorme mejoría. Pridgen cita al padre en un informe posterior: "Cuando me marché de la casa el muchacho iba detrás de un arado y gritando a la mula de una manera que se veía a las claras que había recuperado la alegría de vivir".

Es posible, sin embargo, que este muchacho se infectara y entrase de nuevo en un estado letárgico. Si hubiera vivido en el Tercer Mundo, lo más posible es que no hubiera recibido tratamiento cada vez que lo hubiera necesitado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMMUNITY TO HELMINTHS: READY TO TIP THE BIOCHEMICAL BALANCE. P. M. Brophy y D. I. Pritchard en *Parasitology Today*, vol. 8, n.º 12, págs. 419-422; 1992.

PARASITIC DISEASES, tercera edición. D. Despommier, R. Gwadz y P. H. Hotez. Springer-Verlag, 1995.

MOLECULAR PATHOBIOLOGY OF HOOKWORM INFECTION. P. J. Hotez, J. Hawdon, M. Cappello, B. Jones y D. I. Pritchard en *Infectious Agents and Disease*, vol. 4, n.º 2; junio de 1995.

Perfiles

Alina Quevedo

MARGARITA SALAS : la pasión vírica

La silueta del bacteriófago ϕ 29, con su prominente cabeza en forma de icosaedro alargado que recuerda una bombilla, dibujado con tiza en una pizarra, preside el minúsculo despacho, más o menos la trastienda del laboratorio, que ocupa, en el Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, Margarita Salas.

Este microorganismo era sólo un virus huésped de *Bacillus subtilis*, una bacteria del suelo, hasta que Salas lo adoptó como modelo experimental en sus estudios básicos de biología molecular, a su regreso a España en 1967, después de tres años en el equipo dirigido por Ochoa en el Departamento de Bioquímica de la Universidad de Nueva York.

Allí, Ochoa decidió separarla de Eladio Viñuela, con quien hasta ese momento compartía sus investigaciones en bioquímica clásica. Gracias a esa decisión, y en el ambiente científico estadounidense, muy distinto del que se respiraba en la España de los sesenta, se liberó de ser primero "la novia" y, más tarde, "la mujer de Eladio Viñuela", una situación a la que "nunca me resigné".

Salas había cursado química en la Universidad Complutense de Madrid. Su trabajo de doctorado le mereció el premio Torres Quevedo. El asunto interesó, como información social, al periódico de Oviedo, donde nació hace 57 años, por tratarse de "una asturiana", hija de un conocido médico, el doctor José Salas, más que por el hallazgo de una glucoquinasa específica relacionada con el metabolismo de la insulina.

Conoció a Severo Ochoa cuando cursaba el tercer año de carrera, en una de las visitas que el Nobel solía hacer a Oviedo. Le unía al investigador un parentesco político lejano y la amistad entre el doctor Salas y Ochoa.

La joven estudiante quedó fascinada con el mundo que entrevió a través del entonces nacionalizado norteamericano. Y Ochoa, que tal vez intuyó en su curiosidad una genuina vocación, prometió enviarle, y le envió, un libro sobre la investigación en bioquímica.



MARGARITA SALAS llama al bacteriófago ϕ 29 "mi virus" y espera jubilarse en su compañía

En el equipo de Ochoa, Salas contribuyó a determinar la dirección 3-5, en la que se produce la lectura del mensaje genético en los ARN mensajeros, que transmiten la información genética contenida en el ADN, a la maquinaria de síntesis de proteínas en el citoplasma. "Parece una tontería, pero había que demostrarlo", dice rotunda.

Luego, en colaboración con Wendy Stanley, caracterizó los factores IF1 y IF2, necesarios para la iniciación de la síntesis de proteínas en *E. coli*, cuya función es la unión formilmetionil-ARNt a los ribosomas, en presencia del triplete nucleotídico iniciador AUG. En esta misma línea de trabajo, dentro del sistema de *E. coli* esclareció que el triplete sin sentido UAA marca la terminación de la cadena polipeptídica.

Pero ni los logros obtenidos, ni las óptimas condiciones para investigar fueron suficientes, frente a los "motivos sentimentales", que a los tres años de estar en Estados Unidos, impulsaron a Margarita Salas y Eladio Viñuela a regresar a España.

"Nuestro regreso estaba condicionado a que pudiéramos trabajar; pero, una vez que tomamos la decisión de volver, no quisimos continuar en el tema de Ochoa. Regresábamos para levantar un laboratorio desde cero. Así que optamos por estudiar algún sistema interesante, de fácil manejo y menos competitivo, como son los virus", recuerda. "Solo nos faltaba elegir qué bacteriófago estudiaríamos. De hecho estuvimos pensando en utilizar T-7, algo que afortunadamente no hicimos".

La solución llegó a través de un trabajo de tesis que Viñuela acertó a revisar en la biblioteca. A Salas, le gustó el modesto aspecto del fago en una foto al microscopio electrónico, lo que, unido al tamaño de la cadena de ADN con sólo 19 pares de bases, terminaron por convencerla de que se hallaba ante el fago "pequeñito, complejo y poco

estudiado" que buscaban. Porque el propósito de hacer investigación básica ha sido una premisa permanente para ella. "Hay que hacer ciencia básica. Si se intenta investigar para obtener una aplicación inmediata no se llega a descubrir nada."

Viñuela y Salas comenzaron a experimentar en el bacteriófago ϕ 29, en un laboratorio del Instituto Gregorio Marañón en Madrid, el mismo centro donde habían desarrollado su trabajo predoctoral en enzimología, bajo la dirección de A. Sols, entre 1961 y 1963.

Pero tras pocos años Eladio Viñuela abandonó a Margarita Salas, que permaneció fiel a su ϕ 29, atraído por el virus de la peste porcina africana. "Hubo un momento en el que pensé que las posibilidades de estudio en el fago se habían agotado. Pero entonces aparecieron técnicas de ingeniería genética y, en lugar de cambiar de objeto de estudio, sustituí mis herramienta por otras más modernas. Porque me gustaba mucho mi fago ϕ 29, y espero jubilarme en su compañía". A juzgar por sus datos, no tiene motivos para arrepentirse.

Después de más de 20 años de pesquisas, en colaboración con distintos investigadores, Margarita Salas, premio Santiago Ramón y Cajal en 1973, y miembro de la Academia de Ciencias desde 1988, consiguió desmenuzar los mecanismos moleculares de la morfogénesis del virus. "Un trabajo de chinos, en el que lo normal es que uno se encuentre con una serie de escollos. Por eso hay que tener paciencia y tenacidad, por una parte, e imaginación por otra. Una cierta imaginación para saber ver algo interesante en un resultado que al parecer no dice nada. Pensar, diseñar experimentos, repetirlos una y otra vez hasta comprobar los datos. Por ejemplo, llegar a multiplicar (amplificar) el ADN de ϕ 29, y que resultara infectivo es el resultado de varios años de trabajo de un equipo que puso entusiasmo, rigor y dedicación."

En los noventa su equipo ha logrado transfectar bacterias de *Bacillus subtilis* con el ADN de ϕ 29 sintetizado y amplificado in vitro, un resultado que confirma la pulcritud de sus anteriores hallazgos al poder reconstruir un ADN funcional, capaz de duplicarse en la bacteria.

Salas ha desvelado un sistema muy prometedor para comprender el mecanismo de replicación de ADN y su iniciación. Un proceso para el que se han descrito varias formas: en algunos organismos la réplica se desencadena a través de la síntesis de un ARN iniciador; en otros ocurre una rotura en el ADN que libera un grupo 3-OH. Y también se forman las llamadas horquillas de replicación del ADN.

"En todos los modelos de replicación conocidos, la enzima ADN polimerasa reconoce un grupo 3-OH. Pero en los sistemas como el del fago ϕ 29, con cadenas de ADN lineales, el grupo hidroxilo (OH) lo aporta la proteína terminal", explica con puntillosa minuciosidad quien sugiere que dicho modelo goza de mayor autonomía.

El fago ϕ 29 no necesita utilizar un ARN iniciador que se lo suministre la bacteria en que se hospeda. El propio virus posee su mecanismo de replicación, ya que la ADN polimerasa reconoce el grupo 3-OH de la proteína terminal. El primer indicio de la existencia de una proteína unida a los extremos del ADN del fago ϕ 29 se lo proporcionó una fotografía al microscopio electrónico. "En cada uno de los dos extremos de la cadena lineal se distinguía una protuberancia. Al verla, dijimos: aquí está la proteína terminal."

Hay que hacer ciencia básica. Si se intenta investigar para obtener una aplicación inmediata no se llega a descubrir nada

El hallazgo de la proteína terminal, unida por un enlace covalente a los extremos del ADN del virus, fue fundamental para plantear un nuevo modelo de la iniciación de la replicación, un hito que también la encaminó a otros resultados.

Examinando la secuencia de aminoácidos de una gran variedad de ADN polimerasas, se comprueba que en los organismos procariotas (sin núcleo definido) y eucariotas (con ADN separado del citoplasma) se localizan tres regiones, exo1, exo2, exo3, conservadas. "Esto nos llevó a plantear la hipótesis de que dichas regiones posiblemente formarían el dominio 3-5 carboxi-terminal en las distintas ADN polimerasas."

Para comprobarlo, el equipo que dirige mutagenizó cada uno de los aminoácidos que parecían críticos para la actividad 3-5 exonucleasa de la ADN polimerasa de ϕ 29, mediante una técnica que equivale, por ejemplo, a quitar y poner letras de una palabra y comprobar si la combinación resultante significa algo. El resultado fue que la sustitución de los aminoácidos conservados anulaba la actividad de la polimerasa en la actividad de la iniciación.

La homología de aminoácidos en el dominio 3-5 exonucleasa observada entre polimerasas de diferentes organismos puede dar una pista de la relación filogenética entre virus y plásmidos. "Tal vez la homología de la región carboxi-terminal apunte hacia un origen común, con un tipo de polimerasa primigenia de la que derivaron el resto de estas moléculas."

Profundizando en el modelo de replicación del ADN del fago, apareció un mecanismo que contrarresta los errores en la iniciación de la réplica. Una de las característica de la ADN polimerasa del fago ϕ 29 es que cataliza la iniciación de la replicación y la polimerización de la cadena. "Reconoce el extremo 3-OH de la serina y el AMPc. Pero mientras comprobamos, por su funcionamiento en la replicación (polimerización), que se trataba de una enzima muy fiel, es decir, que cometía muy pocos errores en la inserción de nucleótidos, no ocurría lo mismo en la iniciación, en la que la polimerasa se equivocaba mucho. En vez de una 'A' (adenina) introducía una 'C' (citosina) o una 'G' (guanina). Había una tasa de error de 1 en 100, ante lo que nos preguntábamos: ¿cómo es posible que con una tasa tan alta de error, todavía se conserven los extremos de la molécula del ADN del ϕ 29? La respuesta la obtuvimos al observar que la transición de la iniciación a la polimerización se producía en el segundo nucleótido."

Este trabajo realizado en España por un equipo del Centro de Biología Molecular, que reveló un mecanismo que pone a salvo el proceso de iniciación de los frecuentes errores de la ADN polimerasa, fue la última comunicación que Severo Ochoa presentó a la Academia de Ciencias de Estados Unidos, en junio de 1992.

La ADN polimerasa de ϕ 29, una molécula interesante para la investigación básica, va camino de convertirse en producto comercial. Y Salas, a quien no le atraen las condiciones de hacer ciencia en la industria, "porque hay mucho secretismo, y a mí me gusta contarlo todo", está satisfecha por la posible aplicación de la polimerasa patentada en su laboratorio, una estructura "un poco más lista, muy activa, que empieza su trabajo en una cadena de ADN y sigue hasta el final, sin pararse ni caerse".

Ciencia y sociedad

Médula espinal

El viaje de los axones

El desarrollo a término del sistema nervioso constituye un proceso muy largo. Pese a tratarse de uno de los primeros órganos en generarse, algunas de sus regiones no adquieren plena funcionalidad hasta bien avanzada la vida postnatal.

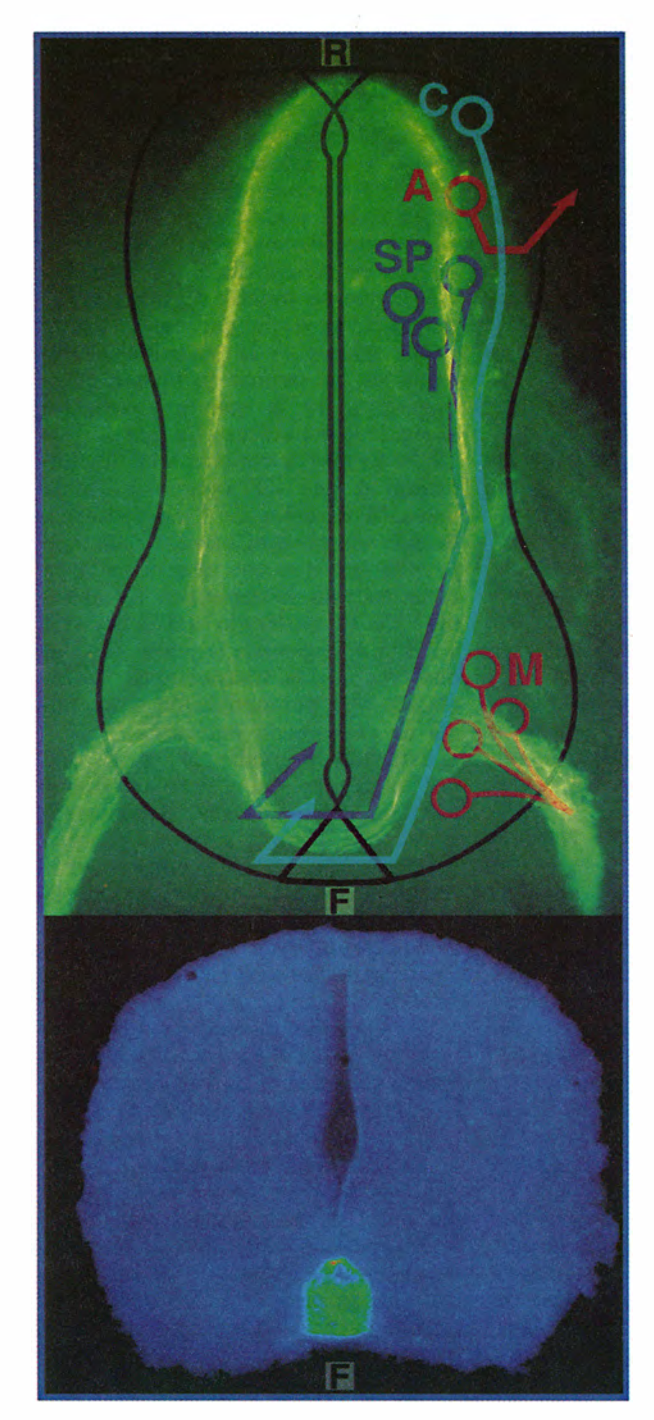
Cientos de miles de tipos célulares tienen que generarse en el tiempo correcto y en el lugar preciso. Las neuronas deben, además, extender sus axones y dendritas, y escoger entre millones de compañeras para establecer las conexiones sinápticas adecuadas. Los mecanismos por los cuales estos eventos ocurren con tanto orden y precisión es, todavía, uno de los mayores misterios para la neurobiología del desarrollo.

En los vertebrados, el desarrollo del sistema nervioso comienza en el estado de gástrula, cuando el embrión consta de tres capas: ectodermo, mesodermo y endodermo. Las señales enviadas desde el mesodermo dan lugar a la formación de la placa neural en el ectodermo que, posteriormente, se pliega a lo largo de su línea media para constituir el tubo neural. De este tubo neural se originan el cerebro y la médula espinal; de su cavidad central, el sistema ventricular. Bordeando la cavidad ventricular se halla la zona germinal, donde se producen las mitosis de las células precursoras y neuroblastos. Las células postmitóticas migran posteriormente a sus localizaciones definitivas.

El desarrollo del tubo neural implica la formación y posterior desmantelamiento de estructuras transitorias, que, a modo de andamios, ejercen su función y después desaparecen. Las dos estructuras transitorias, fuente de señales inductoras para los distintos fenotipos celulares en la médula espinal, son la notocorda (o notocordio) y la placa del suelo, ambas localizadas en la línea media y cuya aparición constituye el primer estadio en el establecimiento del patrón dorso-ventral de la médula espinal.

El notocordio es una estructura de origen mesodérmico localizada en la línea media y justo debajo del tubo neural. Tiene por función inducir la diferenciación de las motoneuronas, mediante liberación de factores difusibles; induce también la formación de la placa del suelo, mediante señales inductoras que requieren el contacto célula-célula. Diversos experimentos han mostrado que la ablación del notocordio determina la formación de un tubo neural carente de placa del suelo y motoneuronas. Por otra parte, el trasplante de un segundo notocordio a regiones dorsales resulta en la aparición ectópica de una segunda placa del suelo y motoneuronas. Una vez que se ha formado la placa del suelo, el notocordio desaparece como tal estructura.

La placa del suelo, la segunda de las estructuras transitorias en aparecer, está integrada por un conjunto



Esquema de la médula espinal de embrión de rata de 13 días, superpuesto sobre una microfotografía obtenida mediante tinción inmunofluorescente con un anticuerpo específico frente a la molécula de adhesión celular TAG-1 (arriba). *A esa edad se hacen evidentes los axones comisurales y las motoneuronas. Los símbolos corrresponden a la estructuras siguientes: F, placa del suelo; R, placa del techo; A, neuronas asociativas; M, motoneuronas; C, neuronas comisurales; SP, neuronas que contienen sustancia P. Las flechas indican las proyecciones axónicas de diversas neuronas. La inmunofluorescencia corresponde a la expresión de la glicoproteína TAG-1 en las motoneuronas que abandonan la médula espinal y en las neuronas comisurales a lo largo de su trayectoria hasta cruzar la línea media en la placa del suelo. La ilustración inferior ofrece, mediante la técnica de la inmunofluorescencia, la expresión del receptor para sustancia P en la placa del suelo de la médula espinal de rata en su décimotercer día de vida embrionaria*

de células epiteliales de origen ectodérmico, localizadas en la línea media ventral del tubo neural. Su función es contribuir, junto con el notocordio, a la diferenciación de las motoneuronas, así como promover y dirigir la trayectoria de axones a través de la línea media de la médula espinal. Acaban de revelarse, en parte, los mecanismos moleculares que capacitan a la placa del suelo para organizar la proyección de axones en desarrollo.

Durante el desarrollo de la médula espinal, las primeras estructuras que aparecen son la placa del suelo, la placa del techo y la cavidad central que constituirá el futuro conducto ependimario. Posteriormente, se diferencian tres tipos neuronales: motoneuronas, neuronas asociativas y comisurales.

Hacia el décimo día de vida embrionaria, las motoneuronas son las primeras neuronas en diferenciarse en la región ventral de la médula espinal y extienden sus proyecciones axonales fuera de la médula para establecer contacto con sus células diana, los músculos. Hacia el día 11, en la región dorsal y adyacente a la placa del techo, se diferencian las neuronas asociativas y las comisurales; las primeras proyectan sus axones lateralmente para unirse al funículo ipsilateral. Los axones comisurales se proyectan ventralmente a lo largo del margen lateral de la médula espinal hasta la columna motora; luego, alteran su trayectoria para dirigirse a la placa del suelo.

Una vez han cruzado la línea media a nivel de la placa del suelo, los axones giran 90 grados para formar proyecciones longitudinales ascendentes en el funículo contra-ventrolateral; en ese momento, desaparece la expresión de la glicoproteína TAG-1, reemplazada por la de otra molécula de adhesión celular llamada L1, la cual parece mediar la fasciculación axonal (agregación de axones para formar haces).

¿Cómo logran los axones comisurales viajar desde la región dorsal hacia la ventral a través de un entorno que no posee una ruta preestablecida? Se sirven, primero, de las moléculas de adhesión que median el contacto célula-célula y que están expresadas en los conos de crecimiento y en las células del entorno; se apoyan, en segundo lugar, en la liberación de factores quimioatrayentes procedentes de la placa del suelo. La idea de que una actividad difusible liberada a gran distancia podía dirigir la trayectoria de los axones fue ya sugerida por Santiago Ramón y Cajal. Sólo recientemente se ha podido demostrar esta teoría y aislar dos proteínas denominadas netrin-1 y netrin-2, así como sus correspondientes ADNc, que están expresadas en la placa del suelo y que son responsables, mediante gradientes de difusión, de guiar los axones.

Hemos identificado una subpoblación de neuronas comisurales que se hallan más ventralmente y que contienen el neuropéptido sustancia P, un neurotransmisor-neuromodulador del sistema nervioso central y periférico en el adulto. En el embrión, y durante tan sólo dos días del desarrollo de la médula espinal, la sustancia P se expresa en una subpoblación de las neuronas comisurales, coincidiendo temporalmente con la travesía de las neuronas comisurales hacia la placa del suelo. La placa del suelo expresa altos niveles del receptor de la sustancia P desde el undécimo día embrionario hasta el quinto día postnatal, cuando la placa del suelo desaparece como tal estructura.

Los experimentos *in vitro* nos han revelado que la sustancia P, liberada por las neuronas comisurales, actúa a través de su receptor ubicado en la placa del suelo e incrementa la liberación de los factores quimioatrayentes.

La importancia de este sistema y de la placa del suelo se hace evidente tras los estudios realizados en ratones mutantes que carecen, en la región lumbar, de dicha estructura. En ellos se manifiesta una desorganización estructural: las neuronas comisurales toman caminos aberrantes, el número de motoneuronas decrece y los animales presentan anomalías funcionales. Se ha descifrado, pues, una pieza más del rompecabezas de la biología del desarrollo. El conocimiento molecular de la formación del sistema nervioso permitirá conocer las claves de la regeneración neuronal.

CARMEN DE FELIPE
Consejo Británico de Investigaciones Médicas (MRC)

Llegado del frío

Condensado de Bose-Einstein

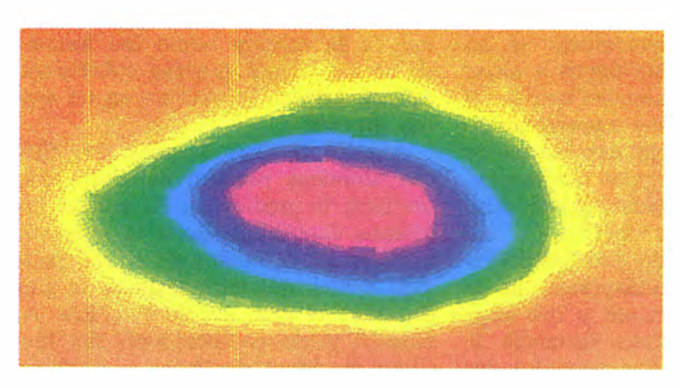
En 1925, Albert Einstein y el físico indio Satyendra Nath Bose razonaron que, si se enfriaba un gas denso hasta una temperatura un pelo mayor que el cero absoluto, se condensaría en un cubo de hielo de un tipo insólito. Los átomos perderían su respectiva identidad y actuarían a una, a la manera como los fotones de un rayo láser avanzan coherentes. Se convertirían, de hecho, en un átomo gigante.

Ahora, 70 años después, los físicos atómicos parecen haber logrado verificar la predicción. Al enfriar los átomos de rubidio hasta la temperatura récord de menos de 10 nanokelvins —diez mil millonésimas de grado sobre el cero absoluto—, Eric A. Cornell y sus colaboradores del Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) en Boulder, crearon en junio el cubo de hielo cuántico: el condensado de Bose-Einstein.

Una de las razones de que este estado de la materia haya llamado la atención de los físicos es su misterio: la teoría dice poco de él salvo que existe. “El condensado es único entre las transiciones de fase”, señala Thomas J. Greytak, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que dirige uno de los otros grupos que han competido a la par con el equipo de Cornell en la búsqueda del condensado. Las demás transiciones de fase —como la del vapor en agua o el agua en hielo— se producen en virtud de las fuerzas que se ejercen entre los átomos y las moléculas, explica Greytak. “Pero en la condensación de Bose-Einstein sólo actúa la mecánica cuántica.”

Más en concreto, actúan las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, que describen el resultado del conocer la posición de una partícula y su momento. Como los átomos apenas se mueven si se enfrían hasta cerca del cero absoluto, el principio de incertidumbre exige que sus posiciones sean desconocidas. Sus funciones de onda —las ecuaciones que describen los átomos— se extienden y mezclan. El resultado es que “tienes un número muy grande de átomos en el mismo estado cuántico”, detalla Cornell. “Viene a ser algo así como lo que ocurre en la superconductividad y en la superfluidez.” Pero, a pesar de los parecidos con el paso sin resistencia de la electricidad y de los líquidos, no se han podido deducir aún las propiedades del condensado. Hasta su aspecto externo está sujeto a cábalas: podría ser transparente como el cristal o lustroso como el metal.

Estas incógnitas deberían recibir pronto alguna respuesta; la colaboración entre el NIST y la Universidad de Colorado ha creado el condensado en la nevera más fría del mundo. El grupo se basó en la técnica de enfriamiento evaporativo. Sus pioneros fueron, a finales de los años ochenta, Greytak y sus compañeros del MIT,



30.000 átomos a 35 nanokelvins, cerca de la condensación de Bose-Einstein. Se han coloreado para que se vea la distribución de los átomos a lo largo de 100 micrometros, del apiñamiento (rojo) *a la dispersión* (amarillo)

y consiste en suspender los átomos entre dos campos magnéticos. Cuando se disminuye un grado el campo y se aplica una erupción de radiofrecuencias, el espín magnético de los átomos más calientes se invierte. Esto los lleva fuera de la trampa, y los átomos más fríos quedan en ella. Paso a paso, la temperatura del conjunto baja. En 1990 Greytak enfriaba con esa técnica los átomos de hidrógeno hasta 100 microkelvins, y se quedaba a un factor de tres a cinco de la condensación de Bose-Einstein.

Pero el progreso se congeló ahí por culpa de un agujero en la trampa. A medida que los átomos residuales vibraban, chocaban unos con otros. Las colisiones invertían a veces los espines de los átomos fríos, que escapaban entonces por el centro de la trampa, donde el campo magnético es nulo. Este resultado no sólo impedía que siguiese el enfriamiento, sino que reducía además el número de átomos por debajo de la cantidad necesaria para formar el condensado.

El año pasado se concibieron con éxito formas de taponar el agujero. Wolfgang Ketterle, del MIT, empleó luz de láser para que los átomos siguiesen atrapados, y el grupo de Cornell se basó en un tipo especial de campo magnético, que, en esencia, hacía que el agujero de la trampa circulase tan deprisa que a los átomos no les diese tiempo a salir por él. Sellado así el portillo de escape, ambos equipos lograron progresos notables. En menos de ocho meses, Cornell pudo multiplicar por mil el enfriamiento.

La verdad es que el enfriamiento evaporativo funciona tan bien que podría haberse formado el condensado sin que los investigadores lo advirtieran. "Nuestro problema no ha sido tener que llegar a temperaturas menores", señala Greytak. "Ha sido observar el gas." A medida que la temperatura cae, también lo hace el tamaño de la nube de átomos, y cuesta más estudiarla.

Pero el grupo de Cornell se lleva la palma. Mientras barrían la nube de átomos de rubidio con un láser, hallaron un un aumento drástico de la densidad en la parte central. "Es una manifestación mucho más espectacular de lo que jamás hubiéramos esperado", dice Carl E. Wieman, de la Universidad de Colorado.

El grupo tiene todavía que determinar las propiedades del condensado, pero la sustancia puede sobrevivir, en principio, alrededor de un minuto antes de congelarse y convertirse en hielo de rubidio, tiempo más que suficiente para realizar experimentos con láseres, que duran milisegundos. Puede que la carrera haya terminado, pero con lo poco que se sabe de la sustancia, los físicos deberían de encontrar muchísimo más que un frío alivio.

PHILIP YAM

Pediatría

Obesidad infantil

La obesidad es uno de los problemas de salud pública más importantes en los países desarrollados. Diferentes estudios indican que su incidencia en EE.UU. oscila entre el 25 y 34 % en la población adulta, entre el 25 y 30 % en adolescentes y entre el 10 y 15 % en niños. Lo más preocupante es que los datos del norteamericano Servicio Nacional de la Salud y Seguimiento de la Nutrición muestran que, en el período comprendido entre 1963/1965 y 1976/1980, se produjo un incremento de la prevalencia de la obesidad del 54 % en niños de 6 a 11 años, y del 39 % en adolescentes de 12 a 17 años.

En España no se dispone de datos globales. De las investigaciones realizadas en diferentes comunidades autónomas, se infiere que la incidencia de la obesidad se cifra en torno al 6 % para ambos sexos en la población prepuberal, y alrededor del 9 y 10 % para varones y mujeres puberales, respectivamente.

La preocupación por la obesidad en la edad pediátrica tiene un doble fundamento. En primer lugar, la tendencia a perpetuarse a lo largo del tiempo, según la edad en que se inicie y a tenor de su intensidad. Existen tres períodos críticos para el desarrollo de la obesidad: período prenatal, período de rebote de la adiposidad que fisiológicamente ocurre entre los 5 y 7 años, y período de la adolescencia. La tendencia a la cronicidad, así como a la morbilidad asociada, puede depender del período en el cual la obesidad se desarrolla. Es difícil predecir, caso por caso, si un niño obeso se convertirá en adulto obeso. Sí sabemos, por diversos estudios epidemiológicos, que aproximadamente el 40 % de niños de 7 años y el 75 % de adolescentes obesos serán adultos obesos.

El segundo fundamento en que se basa nuestra preocupación por la obesidad pediátrica reside en el elevado número de alteraciones que ésta ocasiona. Destacan, a corto plazo, las alteraciones psíquicas (a menudo infravaloradas por los adultos, y que por sí solas justifican el tratamiento de la obesidad), ortopédicas, dermatológicas, respiratorias y otras. A medio y largo plazo inciden alteraciones potencialmente más graves: hipertensión, alteraciones del metabolismo de los hidratos de carbono (diabetes mellitus no dependiente de insulina) y de los lípidos (de las lipoproteínas y apoproteínas), que a su vez son las principales causas de morbilidad y mortalidad en adultos. Está ampliamente documentado que la expectativa de vida de una persona obesa es inferior a la de una no obesa.

Vista su importancia, ¿cuáles son las causas de la obesidad infantil? ¿Qué medidas preventivas conviene tomar? Objeto de debate, hay autores que propugnan una etiología genética exclusivamente, mientras que otros atribuyen un peso mayor a los factores ambientales. Los primeros basan sus conclusiones en los estudios realizados en jóvenes holandeses que habían sido adoptados, y en los que se evidencia una estrecha correlación entre su índice de masa corporal (parámetro utilizado para valorar la obesidad) y el de los padres biológicos, y no con el de los padres adoptivos.

Los autores que consideran determinantes los factores ambientales basan sus argumentos en que el incremento de la prevalencia de la obesidad demostrada en los países desarrollados no puede atribuirse de

forma exclusiva a los factores genéticos. Deben, pues, intervenir otros factores. Y citan la lactancia artificial e introducción precoz de la alimentación complementaria, nivel socio-cultural medio-bajo, hijo único o menor, hijos de padres separados, horas de ver televisión, e incluso otros factores como densidad de población o estación del año. La verdad es que muchos de estos factores que aparecen en determinados estudios epidemiológicos no responden a una contrastación empírica.

Actualmente se acepta que ambos factores, los géneticos y los ambientales, confluyen en la aparición de de la obesidad. Los factores genéticos determinan qué individuos pueden ser obesos si se da cierto estilo de vida, pero éste será el que decida si se convierten en obesos reales. La herencia determina la predisposición, pero es el ambiente el que fija la prevalencia.

El tratamiento de la obesidad es difícil, ya que sólo del 10 al 30 % de los pacientes tratados eficazmente consiguen mantener la pérdida de peso. Por ello es fundamental realizar programas preventivos, dirigidos sobre todo a los niños de riesgo (hijos de padres obesos) y en los períodos críticos para el desarrollo de la obesidad (antes de los 5-5,5 años y durante la adolescencia). Se calcula que con una profilaxis adecuada se puede prevenir hasta el 15 % de adultos varones obesos, y mayor porcentaje en mujeres.

Entre las medidas preventivas razonables, aunque en algunos casos no esté probada del todo su eficacia, suelen mencionarse: promoción de la lactancia materna y evitar la sobrealimentación en el lactante (no utilizar la alimentación como apaciguador); promoción del ejercicio físico; educación a niños escolares y adolescentes, así como a padres y maestros, sobre las características de una dieta equilibrada; evitar los errores alimentarios más frecuentes, como el picoteo no alimenticio; control periódico de peso y talla para detectar precozmente el desarrollo de la obesidad.

Añádase, además, que junto con la pérdida de grasa corporal (evidenciada con la pérdida de peso) debe conseguirse mantener el crecimiento en altura, hecho diferencial con el tratamiento de la obesidad del adulto. Por ello, los tres pilares básicos del tratamiento (dieta, ejercicio físico y psicoterapia) deben dejarse en manos de un equipo especializado.

La obesidad infantil es un campo abierto a la investigación: métodos de medición de grasa corporal (que es lo que define propiamente a la obesidad), factores hormonales y otros de los que depende la diferente distribución de la grasa entre adolescentes masculinos y femeninos, análisis sobre los efectos mórbidos de la grasa intrabdominal (predictora, en hombres, de hipertensión, hiperlipidemia y enfermedad coronaria), etcétera. El avance en esos campos permitirá el desarrollo de medidas preventivas y terapéuticas más eficaces en el futuro.

JAIME DALMAU SERRA
Hospital Infantil La Fe
Valencia





Alteraciones ortopédicas (genu valgo). *Pseudohipogenitalismo (genitales normales cubiertos por la grasa púbica) como causa de problemas psicológicos. No es un problema de estética, es un problema de salud*

Receptores neuronales

De glutamato

Como postulara Santiago Ramón y Cajal con su teoría neuronal, la transferencia de información de una célula nerviosa a otra se realiza principalmente en los puntos de contacto sináptico.

En el sistema nervioso central (SNC), la mayoría de las sinapsis excitadoras usan el ácido glutámico como substancia neurotransmisora. Este ha de reconocer estructuras receptoras específicas situadas en la célula diana. Pero los receptores que el glutamato reconoce en la célula postsináptica no sólo median la transmisión normal de la información, sino que participan también en la maduración de las conexiones sinápticas y en el crecimiento y estructuración celular. El glutamato se comporta así como un auténtico factor trófico.

Además, la activación de algunos receptores de glutamato puede conllevar la generación de fenómenos plásticos perdurables, como ocurre con la variación, por uso, de la eficacia sináptica. Este fenómeno, inducible casi de por vida, es la base celular de los procesos de aprendizaje. Pero la sobreexcitación de ciertos receptores glutamatérgicos puede también desencadenar procesos degenerativos y provocar la muerte de neuronas. Lo que significa que los mismos mecanismos fisiológicos, activados indebidamente, provocan la pérdida de elementos neuronales. Parece, pues, existir una débil frontera entre la función normal y las reacciones neurotóxicas. El entender la naturaleza y función de los receptores de glutamato constituye uno de los grandes retos de la neurobiología moderna.

Gracias al maridaje de las técnicas de biología molecular con métodos refinados de registro electrofisiológico (pinzamiento de membrana, o *patch-clamp*), el conocimiento de las propiedades de los receptores que posibilitan la transducción de la información en esas vías excitadoras ha avanzado de forma espectacular.

Se ha demostrado la existencia de dos grandes familias de receptores: metabotrópicos y ionotrópicos. Componen la primera familia aquellos receptores que se encuentran unidos a elementos de transducción intracelular (proteínas G). Su activación conlleva la activación o inhibición de enzimas que producen segundos mensajeros (adenosín monofosfato cíclico y trifosfato de inositol -IP3-). Se han clonado ya ocho genes diferentes que codifican otros tantos receptores metabotrópicos, la existencia de los cuales está cambiando nuestra visión acerca del funcionamiento de las sinapsis excitadoras.

La otra gran familia comprende los receptores que forman un canal iónico. La activación de los receptores ionotrópicos conlleva la apertura del canal, permitiendo el trasiego iónico a través de la membrana con el consiguiente efecto excitador. Los receptores glutamatérgicos ionotrópicos median la mayor parte de la transmisión sináptica excitadora de carácter rápido.

Dentro de la familia de los ionotrópicos parecen existir al menos tres receptores con propiedades farmacológicas y funcionales diferentes, que se definen por la acción de agonistas selectivos: N-metil-D-aspartato (NMDA), α-amino-3-hydroxi-5-metilisoxazol-4-propionato (AMPA) y ácido kaínico (kainato); el ácido kaínico puede activar también el receptor de AMPA.

Se ha demostrado que al menos los receptores de NMDA y AMPA coexisten en la misma sinapsis. Asimismo, el ácido glutámico activa el receptor de kainato, que es un receptor ionotrópico insensible a AMPA, con la propiedad de que tras su activación sufre una rápida desensibilización (en milésimas de segundo). Nuestro grupo del Instituto Cajal de Madrid ha identificado este receptor en neuronas del hipocampo en culti-

Río de barro

Hace cuatro años, el monte Pinatubo, de las islas Filipinas, despertó de un letargo de seis siglos, arrojando una enorme cantidad de materia volcánica. Las partículas pequeñas, llegadas hasta la parte alta de la atmósfera, se dispersaron. Pero el grueso de la erupción cayó sobre los habitantes de la zona, en un suerte de lechada de cemento hecho de ceniza y lluvia. Los ocho kilómetros cúbicos de material expulsado por el volcán dejó los contornos cubiertos de una gruesa capa de cenizas de potencia suficiente para abatir los edificios. El volcán cubrió el planeta con una manta de aerosoles estratosféricos que dispersaron la luz solar hasta el punto de enfriar la Tierra.

Los efectos climáticos de escala global han amainado. No así el daño local. Persisten las coladas de cenizas volcánicas, llamadas lahares, que se forman al iniciarse una erupción volcánica violenta. Estos ríos viscosos de barro (*derecha*) pueden ser devastadores, a menudo más que las propias explosiones. En 1985 los lahares de la erupción del Nevado del Ruiz en Colombia mataron a 23.000 lugareños. Los habitantes de los aledaños del Pinatubo, huidos, continúan esperando que la nueva superficie débilmente consolidada se estabilice, para volver. Pero después de permanecer cerca de 600 años dormido, no parece que tenga mucha prisa en tornar a la normalidad.

DAVID SCHNEIDER



vo, si bien su papel biológico está aún por determinar. Reina todavía cierta confusión en torno a la identidad del receptor de kainato, y lo que se creía hasta muy recientemente que era el receptor de kainato correspondía en realidad a la acción inespecífica del propio kainato sobre el receptor de AMPA.

El subtipo NMDA de receptor glutamatérgico es el mejor caracterizado. Se trata de un canal catiónico que permite el trasiego de iones Na^+, K^+ y Ca^{2+} y que posee diversos lugares susceptibles de modulación, tanto por agentes endógenos como exógenos. Es el único receptor que requiere, para su activación, del concurso de dos diferentes ligandos (glutamato y glicina). Además, el receptor de NMDA es sensible a la concentración extracelular de Mg^{2+} y Zn^{2+}, así como al *p*H extracelular y al estado redox. Más recientemente se ha descrito la existencia de un lugar donde las poliaminas endógenas espermina y espermidina se unirían para potenciar su actividad. En nuestro laboratorio se ha demostrado que esta potenciación se debe a una reducción del grado de desensibilización del receptor.

El receptor de NMDA es, pues, sumamente complejo, no sólo en sus mecanismos de activación y modulación, sino también en las consecuencias de su activación. Se ha demostrado que este receptor de NMDA interviene en la generación de fenómenos plásticos, así como en el desencadenamiento de procesos de muerte celular. Ofrece prometedoras posibilidades para su modulación artificial, ya sea con agentes exógenos o mediante estrategias diseñadas para potenciar o deprimir aspectos de interés. El conocimiento de las propiedades farmacológicas y biofísicas y de los mecanismos moduladores del receptor de NMDA es un requisito esencial para el desarrollo de drogas o tratamientos con potencial terapéutico.

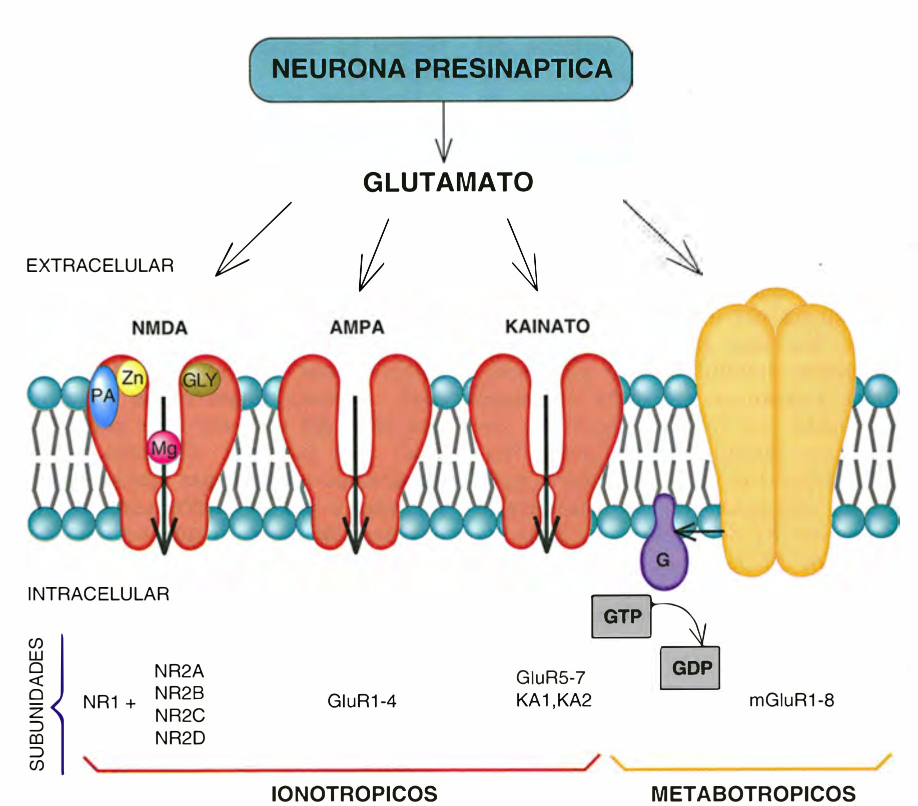
Fruto, sobre todo, del trabajo de los laboratorios liderados por Heinemann, Mishina, Nakanishi y Seeburg, se han clonado más de 20 subunidades diferentes de receptores ionotrópicos para glutamato. La disponibilidad de los ADNc ha abierto las puertas al estudio de los determinantes moleculares que imprimen las diversas propiedades a los receptores en las membranas.

El análisis molecular y funcional de los receptores de glutamato está revelando mecanismos insospechados de regulación que explican numerosas características de los receptores nativos (receptores que normalmente expresan las células nerviosas), y ello se debe a dos razones fundamentales. La primera es que los receptores ionotrópicos muy probablemente estén formados por el ensamblaje de 5 subunidades (pentámero); la segunda es la existencia de varias subfamilias de subunidades. Las múltiples combinaciones de estas subunidades podrían ser responsables de la diversidad funcional que los receptores de glutamato presentan.

En efecto, podemos obtener receptores funcionales de N-metil-D-aspartato por ensamblaje heteromérico de dos tipos de subunidades, la NR1 y cada una de las 4 subunidades NR2 (NR2A-D), con propiedades similares a las descritas en receptores nativos. La subunidad NR1 aparece en 7 formas diferentes generadas por procesamiento diferencial de los ARN, otorgando cada una de ellas al heterómero propiedades farmacológicas peculiares. La subunidad NR1 es ubicua en el sistema nervioso central; las subunidades NR2 presentan perfiles diferentes de expresión espacial y temporal a lo largo del desarrollo y cumplen misiones distintas en las diferentes poblaciones neuronales del SNC. Se entiende, pues, que a las subunidades NR2 se les atribuya un papel modulador: los receptores recombinantes de NMDA adquieren características funcionales diferentes de acuerdo con la subunidad NR2 que se ensamble con la NR1.

La familia de los receptores de AMPA comprende 4 subunidades que guardan una estrecha homología entre sí. Cada una puede existir en dos isoformas diferentes. Mediante el empleo de anticuerpos específicos para cada subunidad, se ha demostrado que se expresan en zonas cerebrales distintas. A ello hay que sumar un grado adicional de complejidad: como la expresión de las distintas subunidades que constituyen los receptores varía en el tiempo, las propiedades de las distintas poblaciones neuronales pueden variar a su vez durante el desarrollo.

Los receptores de kainato poseen cinco subunidades: KA1, KA2, GluR5, GluR6 y GluR7. Se supone que *in vivo* los receptores de kainato están compuestos por estas subunidades asociadas de forma heteromérica. Pero no ha resultado fácil demostrar la existencia de este tipo de receptores. En nuestro laboratorio se ha logrado poner de manifiesto, mediante técnicas de pinzamiento de membrana y perfusión rápida, que un alto



Tipos de receptores neuronales para glutamato. El esquema representa los tres grandes tipos de receptores ionotrópicos, NMDA, AMPA y kainato junto a un receptor metabotrópico-tipo, unido a una proteína G (G). También se indican las subunidades que forman cada uno de ellos. Independientemente de su especificidad farmacológica, todos ellos son activados por el ligando endógeno glutamato

porcentaje de neuronas aisladas del hipocampo y mantenidas en cultivo expresan este tipo de receptores de glutamato. Y, mediante la técnica de multiplicación ("amplificación") de los ARN mensajeros extraídos de células únicas, determinamos que estos receptores están compuestos por subunidades GluR6. No sabemos, sin embargo, qué función desempeñan en el sistema nervioso central.

De los tres tipos principales de receptores ionotrópicos de glutamato, el de kainato es, sin duda, el menos estudiado. La falta de agonistas específicos dificulta su distinción funcional con los otros receptores, también presentes en la membrana neuronal. El desarrollo de compuestos específicos para los nuevos receptores que ahora se empiezan a conocer, determinará el progreso en este campo.

JUAN LERMA
Instituto Cajal, CSIC. Madrid

Cosmología

¿Crisis? ¿Qué crisis?

¿Qué está pasando en los cielos? ¿Se están resquebrajando los cimientos de la cosmología? "La ciencia es mucho más estable de lo que cierta prensa con pretensiones de seriedad da a entender", reflexiona Allan R. Sandage, uno de los primeros espadas del campo. "Creo que el modelo de la gran explosión, tan denostado, funciona."

El revuelo arranca de un estudio dirigido por Wendy L. Freedman que ha planteado otra vez la cuestión recurrente de la edad del universo. Para calcularla, los astrónomos miden la distancia que nos separa de las galaxias remotas y la velocidad a la que parecen alejarse de la Tierra. De esa información se saca el ritmo de la expansión del universo —la constante de Hubble— y se intenta entonces inferir cuánto tiempo ha transcurrido desde la gran explosión.

Freedman y sus compañeros quieren reunir, con el *Telescopio Espacial Hubble*, una colección de distancias precisas a galaxias hasta cierto punto cercanas. Este esfuerzo sólo ha ofrecido hasta ahora una nueva medición de la distancia a la que se halla M100, perteneciente al cúmulo de Virgo. De acuerdo con esa observación de M100, la constante de Hubble tiene un valor elevado, del cual, si fuera correcto, se seguiría una edad del universo muy pequeña: ocho mil millones de años. Pero otros datos indican que ciertas estrellas tienen por lo menos catorce mil millones de años, lo que no deja de resultar paradójico.

Pero medir la distancia a la que están unas galaxias alejadas de nosotros millones de años luz es una tarea plagada de errores potenciales, como la propia Freedman se apresura a reconocer. Virginia L. Trimble señala que se sigue desconociendo la distancia exacta al cúmulo de Virgo, ya que los astrónomos no saben dónde está M100 con relación al centro del cúmulo; sutiles diferencias en la composición de las estrellas de M100 podrían hacer que se comportaran de una manera un poco diferente a las de nuestra Vía Láctea. Aun así, Freedman está dispuesta a sostener que "los mejores valores de la constante de Hubble son altos".

Otros no andan tan seguros. Con los valores elevados se escriben reportajes muy sugestivos, pero hay numerosos estudios que no concuerdan con los nuevos resultados. Durante más de veinticinco años, Sandage ha defendido con vehemencia un valor mucho menor de la constante de Hubble, y, en consecuencia, que el universo es mucho más viejo; hasta veinte mil millones de años podría tener en tal caso. Sandage, además, se sirve de los últimos datos procedentes del *Telescopio Espacial Hubble* para respaldar su postura, y no está solo. Bradley E. Schaefer reunió hace poco las estimaciones publicadas de la constante de Hubble, y halló que los valores bajos tenían tanto apoyo como los altos. "La pelota está en el alero", concluye.

Las lentes gravitatorias podrían descubrir la edad del universo

Y aunque los astrónomos consiguiesen por fin determinar claramente la constante local de Hubble, explica Trimble, "no hay una conexión directa entre la constante de Hubble y la edad del universo": ésta depende, y mucho, de la densidad del universo, que se desconoce, y de la versión de la teoría de la gran explosión con la que uno se quede. Además, puede que el ritmo local de la expansión no refleje lo que pasó en otros sitios y otras épocas.

Emilio E. Falco, de la Universidad de Harvard, confía en que el estudio de las lentes gravitatorias lleve a una medición con sentido de la expansión a gran escala del universo, "pero hemos de esperar unos cuantos años". Los cosmólogos veteranos aceptan ese marco de tiempo. "Espero vivir lo bastante para ver la solución", dice Trimble.

COREY S. POWELL

Picaduras por garrapata

Enfermedades asociadas

Tras una noche de insomnio, me levanto y me doy una ducha. ¡Qué curioso! Me ha salido un lunar nuevo. Cuál es mi sorpresa cuando veo que no se trata de un lunar y que, tras manipularlo, se mueve. No tardo en descubrir al invasor: una minúscula garrapata que me estaba "chupando la sangre". ¿Me transmitirá alguna enfermedad? ¿Debo arrancármela? ¿Acudo al médico?

Aunque probablemente la primera referencia de una enfermedad transmitida por picadura de garrapatas sea la plaga de babesiosis, epizootia que asoló al ganado vacuno del faraón Ramsés II (*Exodo* 9:3), hasta 1893 no se demostró que estos artrópodos eran vectores de enfermedades. Lo descubrieron Smith y Kilburne al observar la transmisión de la fiebre de Texas en el ganado. Desde entonces, se ha ido conociendo que las garrapatas vehiculan las enfermedades infecciosas más importantes en el mundo industrializado, aunque a nivel global los mosquitos siguen causando mucha más morbilidad y mortalidad como transmisores de enfermedades.

Las garrapatas son parásitos obligados, emparentados con las arañas, que precisan chupar sangre para desarrollar su ciclo biológico. (Las garrapatas pican, no muerden, pues introducen una especie de cuchillos denominados quelíceros que cortan la piel en la que se anclan.) Tienen su fuente de alimentación en mamíferos, aves y reptiles. A su capacidad de chupar sangre va unida su función de transmisores y reservorio

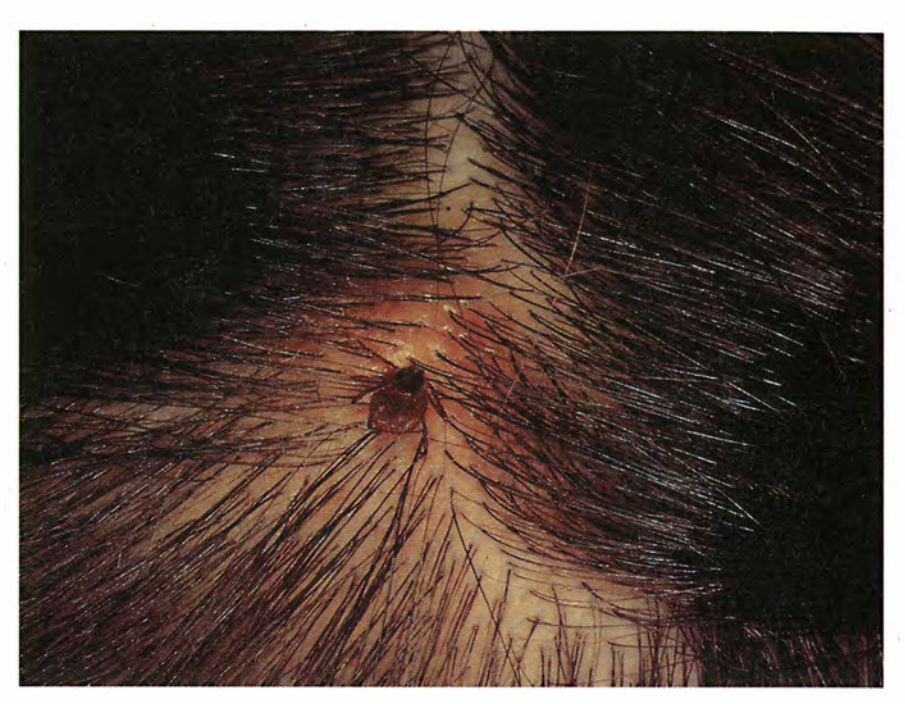
de diferentes procesos bacterianos, víricos, protozoarios, helmínticos e incluso fúngicos. Las garrapatas no se limitan a transmitir procesos infecciosos; pueden provocar parálisis neurotóxica, irritaciones en el punto de picadura y, sobre todo, importantes daños económicos, calculados en varios cientos de miles de millones al año, por la anemia que producen en el ganado doméstico al chuparles la sangre.

Conocemos al menos 850 especies de estos artrópodos, que se subdividen en dos familias con interés sanitario: garrapatas duras (*Ixodidae*) y garrapatas blandas (*Argasidae*). Las duras transmiten la mayoría de los procesos infecciosos y no infecciosos que conocemos; entre nosotros son vectores de la borreliosis de Lyme, fiebre botonosa o exantemática mediterránea, ehrlichiosis, babesiosis, tularemia, encefalitis vírica y parálisis neurotóxica. Por su parte, las garrapatas blandas transmiten la fiebre recurrente endémica.

¿Dónde habitan las garrapatas? Se puede decir que en todas las zonas donde existan unas mínimas condiciones de supervivencia. Hay especies exigentes con el clima que precisan de un ambiente húmedo y una determinada vegetación, como *Ixodes ricinus*, transmisor de la borreliosis de Lyme. Otras especies se adaptan bien a hábitat secos, como la garrapata marrón del perro (*Riphicephalus sanguineus*), que transmite la fiebre botonosa o exantemática mediterránea. Podemos encontrar garrapatas y sufrir su agresión en parques y jardines urbanos donde merodeen animales, en zonas de cultivo, riberas y, sobre todo, en bosques. Algunas especies colonizan incluso habitáculos humanos por cuya proximidad pasen rebaños o donde se críen animales domésticos.

No siempre que nos pica una garrapata desarrollaremos una enfermedad asociada. Lo más frecuente es que no nos ocurra nada, o que desarrollemos una papulita pruriginosa en el punto de picadura; sólo un pequeño porcentaje de los picados sufrirán la patología asociada.

Para que se dé una determinada afección transmitida por garrapatas deben cumplirse ciertas condiciones. En primer lugar, debe estar presente el reservorio de la enfermedad, constituido habitualmente por pequeños roedores y en ocasiones por la propia garrapata. Como es obvio, la garrapata competente para la transmisión de la afección debe picar a la víctima; y, por último, la víctima debe ser susceptible a esa enfermedad.



Garrapata Ixodes ricinus *alimentándose sobre el cuero cabelludo de un paciente*

Añádase que, para que en una determinada zona se produzcan enfermedades transmitidas por garrapatas, ha de existir una amplia y variada población de garrapatas, cuestión que va a depender de la densidad de animales en la zona, tanto en explotación ganadera como salvajes.

Salvo excepciones, los microorganismos que transmiten las garrapatas no son simbiontes con el artrópodo. Estas ingieren las bacterias, virus o protozoos infecciosos al alimentarse en los animales reservorios de la enfermedad. Pero, ¿cómo los transmiten? El modelo mejor estudiado, y que más nos interesa por las características epidémicas que está tomando en el mundo industrializado, es el de la borreliosis de Lyme. Causado por una bacteria descrita en 1981, denominada *Borrelia burgdorferi* en honor de su descubridor Willy Burgdorfer, se encuentra en nuestro medio infectando el intestino de *Ixodes ricinus*. El ciclo biológico de esta garrapata, al igual que el del resto de las garrapatas duras, pasa por diferentes fases o estadios. Las formas inmaduras (larva y ninfa) se alimentan en el animal reservorio de la enfermedad y de ese modo ingieren la bacteria *B. burgdorferi*. Luego, al producirse la picadura, ninfas y adultos hembras transmiten la infección.

Al picar a la víctima, las garrapatas chupan la sangre sirviéndose del hipostoma, una suerte de trompa. Las bacterias alcanzan entonces las glándulas salivares. Cuando la garrapata está ahíta, las bacterias pasan, por regurgitación, a la víctima. Este proceso dura un mínimo de tres días, cuestión que reviste particular interés desde el punto de vista preventivo; nos ahorraremos la infección, si tras la salida al campo, eliminamos cualquier intrusa que pudiera haber hecho blanco en nosotros.

Un problema con el que nos encontramos a la hora de diagnosticar enfermedades transmitidas por garrapatas es el desconocimiento de la realidad misma de la picadura. La mitad de los episodios pasan inadvertidos. En el caso de la borreliosis de Lyme, en la que la variedad de manifestaciones clínicas y la falta de especificidad de las mismas es frecuente, la ignorancia del antecedente puede dificultar mucho el diagnóstico. A veces transcurren varios meses desde que se produjo la picadura y la aparición de los síntomas.

Unicamente podremos librarnos de estas enfermedades usando repelentes, detectando precozmente la picadura mediante revisiones tras las salidas al campo, y retirando cuidadosamente el artrópodo mediante unas pinzas. De acuerdo con la experiencia de nuestro grupo de investigación, deben desecharse otro tipo de manipulaciones —uso de aceite, gasolina, etc.— que añaden un riesgo ulterior al provocar que la garrapata regurgite y nos inocule el contenido de sus glándulas salivares.

José A. Oteo Revuelta
Servicio de Medicina Interna
Hospital de La Rioja, Logroño

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Frugivorismo

En el mundo tropical existe una relación muy estrecha entre plantas y animales. De un 50 a un 90 % de los árboles y arbustos, según del hábitat que se trate, confían en los vertebrados frugívoros para la dispersión de sus semillas; por su parte, el grueso de la biomasa de los vertebrados de las selvas se mantiene de frutos carnosos. En la relación entre animales y plantas hay, en efecto, implicados grupos y especies muy dispares. Uno de ellos es *Carludovica*. Esta planta, perteneciente a la familia de las Ciclantáceas, vive en el suelo o sobre troncos de árboles del trópico americano. En las epífitas, la parte más vieja del tallo muere a la misma velocidad con que se desarrolla por el extremo, y así la planta trepa tronco arriba, lentamente, como si fuera un lagarto.

De dispersar sus semillas se ocupan diversas especies, entre ellas *Capito squamata*, avecilla de las pluviselvas del sudoeste de Colombia y oeste del Ecuador. Pertenece a los capitónidos, una familia pantropical emparentada con los picos carpinteros, con 76 especies (12 en América), que tienen sus principales representantes en Africa y en el sudeste asiático; se alimentan fundamentalmente de frutos.

Estábamos en la reserva ecuatoriana de Río Palenque. Desde el interior de la casa, vimos cómo varios pájaros acudían insistentemente a una planta con aspecto de palmera, *Carludovica palmata*. Bajamos al jardín con los trípodes, las cámaras y los flashes. Para que los animales no huyeran espantados, permanecimos pegados al edificio; con estudiada morosidad, uno de nosotros se fue acercando en aproximaciones sucesivas y escalonadas. Los frutos ejercían una gran atracción sobre las aves, mayor que miedo les pudiera producir nuestra presencia inmediata. Los fotografiamos con un teleobjetivo de 500 mm.







La aritmética de la ayuda mutua

Experimentos informáticos muestran que es la cooperación, y no la explotación, el factor dominante en la lucha darwinista por la supervivencia

Martin A. Nowak, Robert M. May y Karl Sigmund

El principio de toma y daca impregna toda nuestra sociedad. Es más antiguo que el comercio y el trueque. Quienes viven en una misma casa, por ejemplo, participan en un incesante, y casi inconsciente, intercambio de bienes y servicios. Estos intercambios les resultan cada vez más fascinantes a los economistas. Y lo mismo les ocurre a los biólogos, quienes han recogido multitud de ejemplos similares en grupos de chimpancés y otros primates. El propio Charles Darwin tenía plena conciencia del papel de la cooperación en la evolución humana. Así escribía en *El origen del hombre*: "La poca fuerza y velocidad del hombre, su carencia de armas naturales, etc., quedan holgadamente compensadas por sus... cualidades sociales, que le llevan a dar y recibir ayuda de sus congéneres."

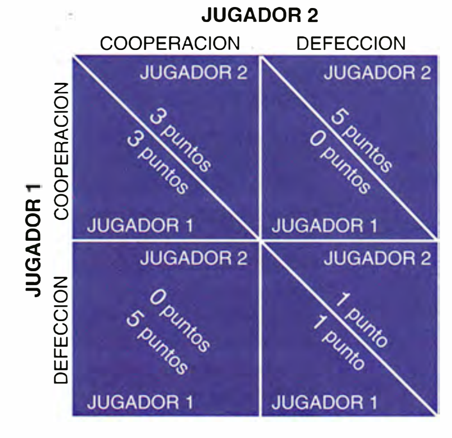
Evidentemente, una gran distancia separa estas ideas de la salvaje existencia humana que el filósofo Thomas Hobbes calificaba como "solitaria, pobre, detestable, brutal y breve". No obstante, buen número de los primeros seguidores de Darwin cargaron las tintas en los aspectos feroces de "la lucha por la supervivencia", hasta el punto de que el príncipe ruso Kropotkin se sintió obligado a escribir un libro para refutarles. En *El apoyo mutuo, un factor de la evolución*, aclamada por el *Times* londinense como "posiblemente el libro más importante del año" (1902), Kropotkin trazó un vasto fresco donde mostraba a la cooperación actuando entre las hordas siberianas, entre los

1. LA PROCLIVIDAD hacia la cooperación en la sociedad rural de los Amish, en Lancaster, Pennsylvania, se manifiesta en la erección cooperativa de cubiertas. Los Amish se benefician de una cultura que fortalece tales formas de ayuda mutua voluntaria.

isleños polinesios y en los gremios medievales. Kropotkin era un célebre ideólogo del anarquismo, pero su incursión en la historia natural, aunque superficial, no se debía a mera afición: para alguien como él, decidido a librarse del estado, resultaba esencial demostrar que la cooperación humana no estaba impuesta por la mano férrea de la autoridad, sino que sus orígenes arraigaban en condiciones naturales.

En cierto modo, sus argumentos han tenido mucho más éxito del que Kropotkin pudo llegar a prever. Profusión de estudios de antropología y primatología indican el aplastante papel de la ayuda recíproca en las primitivas sociedades de homínidos. Los textos de comportamiento animal están llenos de ejemplos de mutualismo: en el aseo, la alimentación, la enseñanza, la advertencia, la ayuda en la lucha y la caza en grupo. En ecología, se atribuye un papel fundamental creciente a las asociaciones. Los biólogos encuentran ejemplos de cooperación en el dominio celular, en el de los orgánulos e incluso de las moléculas prebióticas.

Pero al mismo tiempo, todavía más



2. PAGOS VARIABLES, según que uno, ambos o ninguno de los jugadores opten por cooperar. Las asignaciones de puntos como ésta provocan la clásica paradoja de teoría de juegos conocida por "dilema del preso".

paradójica resulta la ubicuidad que la cooperación parece haber alcanzado. El anarquista ruso no había sabido ver hasta qué punto está la cooperación amenazada por la explotación. ¿Qué impide que los mutualistas se tornen en parásitos? ¿Por qué habría nadie de aportar su parte al esfuerzo común, en lugar de aprovecharse del de los demás? La selección natural prima el éxito reproductor del individuo. ¿Cómo puede este mecanismo moldear un comportamiento que sea altruista, en el sentido de que beneficia a otros a expensas de la progenie propia?

Hay dos métodos de abordar esta cuestión, que llevan los encabezamientos de selección de parentesco y de ayuda recíproca. Estas nociones no son mutuamente excluyentes, aunque sí distintas. La selección de parentesco hunde sus raíces en la genética. Si un gen contribuye a asentar el éxito reproductor de parientes cercanos a su portador, está contribuyendo a promover copias de sí mismo. En el seno familiar, las buenas acciones son su propia recompensa. Mas, para que las buenas acciones hacia congéneres no emparentados resulten rentables han de tener contrapartida. La ayuda recíproca, esto es, el intercambio de acciones altruistas en las que el beneficio es mayor que el costo, constituye en esencia un intercambio económico. Opera de un modo menos directo que la selección de pa-

rentesco y es, por tanto, más vulnerable frente a los abusos.

Dos partes pueden dar con un acuerdo mutuamente ventajoso, pero cada una podría ganar todavía más quedándose con la parte que le correspondería aportar. En la sociedad moderna, un enorme aparato jurídico y policial hace posible resistir la tentación de defraudar. Pero, ¿puede funcionar el altruismo recíproco en ausencia de esas instituciones autoritarias tan despreciadas por los anarquistas de Kropotkin? Para responder a esta difícil cuestión convendrá primero considerar sistemas sencillos e idealizados.

El dilema del preso

A fin de poner de manifiesto la paradoja, Robert L. Trivers, sociobiólogo (y con anterioridad, jurista) que actualmente se encuentra en la Universidad de California en Santa Cruz, tomó prestado de la teoría de juegos un símil conocido por "dilema del preso". En la versión en que inicialmente fue concebido, a principios de los años cincuenta, se les pregunta por separado a dos detenidos si el otro ha cometido un delito; la dureza del castigo dependerá de que uno, ambos o ninguno delate al otro. Esta situación puede traducirse a un juego sencillo. Los dos participantes tienen únicamente que decidir si desean o no cooperar. En un ejemplo concreto del "dilema del preso", si ambos optan por cooperar, cada uno recibe una recompensa de tres puntos. Si uno delata al otro y éste a aquél (no cooperan), obtienen solamente un punto cada uno. Pero si uno delata y el otro coopera, el delator recibe cinco puntos, mientras que el jugador que eligió cooperar no recibe nada.

¿Cooperarán? Si el primer jugador delata, el segundo, que coopera, acabará sin nada. Salta a la vista que el segundo jugador debería haber delatado. La verdad es que, aunque el primer jugador cooperase, el segundo debería delatar, porque esta combinación le da cinco puntos, en lugar de tres. Haga lo que haga el primero, la mejor opción del segundo es delatar. Pero el primer jugador se encuentra exactamente en la misma situación. Por tanto, ambos jugadores elegirán traicionar y recibirán un punto cada uno. ¿Por qué no cooperarían?

Las decisiones de los detenidos ponen de relieve la diferencia entre lo mejor desde un punto de vista individual y desde el punto de vista colectivo. Este conflicto pone en entredicho prácticamente todas las formas de cooperación, entre ellas, el intercambio y el mutualismo. La recompensa de la cooperación mutua es mayor que el castigo por delación recíproca, pero la traición unilateral suscita una tentación mayor que la recompensa, dejando al cooperador explotado con un pago, por dejarse timar, todavía peor que el castigo. Esta gradación —desde la tentación, pasando por la recompensa de la cooperación hasta el "pago del pardillo"— implica que la mejor jugada consiste en defraudar siempre, sin tener en cuenta la posible jugada del adversario. La lógica conduce inexorablemente a la mutua defección.

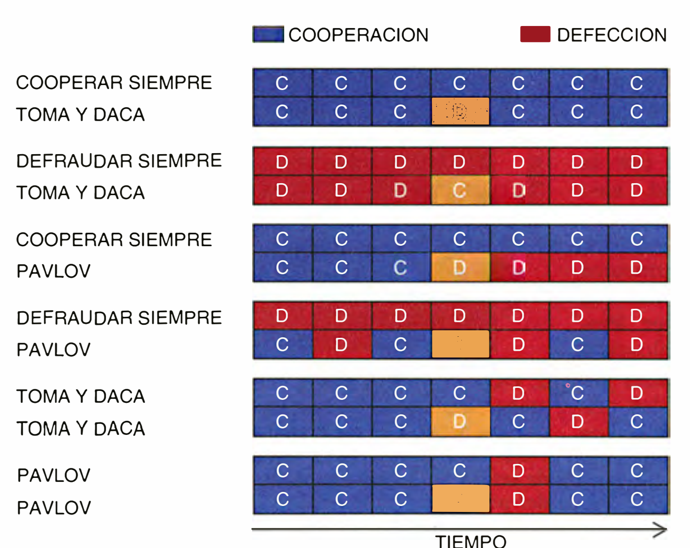
Casi todo el mundo siente desazón ante semejante conclusión. La verdad es que la gente sí suele cooperar, movida quizá por sentimientos de solidaridad o de generosidad. En las transacciones comerciales, la defraudación también es relativamente rara, debido, tal vez, a la presión social. Sin embargo, las reservas de esta clase no habrían de afectar a un juego que capta la vida en un sentido puramente darwinista, en el cual cada posible ganancia (sea en calorías, en apareamientos o en seguridad frente a los depredadores) queda en última instancia convertida en una moneda única: descendencia.

Torneos virtuales

Cabe imaginar un experimento ideal en el cual toda una población esté formada por jugadores programados. Cada uno de estos autómatas se halla firmemente emparejado a una estrategia fija, y, o bien coopera siempre, o bien defrauda siempre. Los jugadores contienden, por el sistema de liga, en un campeonato de "dilema del preso", donde cada uno se enfrenta a todos (incluido él mismo). El pago total de cada contendiente dependerá de los jugadores a los que se enfrente, y por tanto, de la composición de la población. De todas formas, un defraudador logrará siempre más de lo que en su lugar podría ganar un cooperador. Finalizado el imaginario campeonato, los jugadores se reproducen, engendrando descendencia de su misma especie (defraudadores o cooperadores). La generación siguiente vuelve a contender en una liga de iguales características, siendo pagada con progenie, y así sucesivamente. En esta caricatura de la evolución biológica, en la cual el pago es el número de descendientes y en la que las estrategias son hereditarias, el resultado final es obvio: los depredadores irán aumentando sin cesar y podrán acabar invadiendo toda la población.

Hay diversos modos de

JUGADA ANTERIOR			ESTRATEGIAS			
Ultima jugada	Jugada del adversario	Resultado	Cooperar siempre	Defraudar siempre	Toma y daca	Pavlov
C	C	"RECOMPENSA"	C	D	C	C
C	D	"PAGO DEL TIMADO"	C	D	D	D
D	C	"TENTACION"	C	D	C	D
D	D	"CASTIGO"	C	D	D	C



3. LAS ESTRATEGIAS REACTIVAS para el "dilema iterado del preso" pueden depender de los resultados de la ronda anterior. De entre las 16 variantes posibles, vemos aquí cuatro estrategias esenciales (*arriba*). Las repetidas rondas del "dilema del preso" revelan pautas persistentes de cooperación (*azul*) y defección (*rojo*) al irse enfrentando las estrategias seleccionadas en sucesivas rondas (*abajo*). Tras una jugada errónea aislada (*naranja*), la secuencia establecida puede regenerarse o sufrir grandes alteraciones.



4. LOS VAMPIROS suelen participar en actos de mutualismo. Los que han logrado henchirse de sangre de caballos o ganado compartirán su alimento con algún compañero hambriento, regurgitando parte de su contenido gástrico.

escapar a esta suerte. En muchas sociedades, unos mismos dos individuos interactúan no una sola vez, sino frecuentemente. Ahora, cada participante se lo pensará dos veces antes de defraudar, si su jugada provoca que el otro jugador le pague en la misma moneda a la primera ocasión que pueda. Por consiguiente, la estrategia correspondiente al juego reiterado puede variar en respuesta a lo ocurrido en rondas anteriores.

En contraste con el caso "a una vuelta" del dilema del preso, donde siempre es preferible defraudar, existe para la versión reiterada un sinfín de estrategias, ninguna de las cuales constituye una respuesta universalmente óptima frente a todo posible oponente. Si el jugador contrario decidiera, supongamos, cooperar siempre, lo que más nos convendría sería defraudar siempre. Pero si nuestro socio decide cooperar hasta que nosotros defraudemos y no cooperar jamás a partir de ese momento, más nos valdrá no echar a perder esta asociación: la tentación de hacer trampa en un envite y apoderarnos de cinco puntos en lugar de tres estará más que anulada por la pérdida esperada en las rondas subsiguientes, en las que no podremos ganar más de un punto.

La inexistencia de estrategia óptima es crucial. No existe una receta pura y dura para jugar al dilema iterado del preso. El éxito de una estrategia depende de la estrategia del otro jugador, que no es conocida de antemano. Una estrategia feliz en ciertos ambientes puede fracasar estrepitosamente en otros.

Hacia finales los años setenta, Robert Axelrod, profesor de ciencias políticas en la Universidad de Michigan, llevó a cabo en su ordenador una serie de torneos del "dilema iterado del preso". Los contendientes, programas propuestos por sus colegas, traducían elaboradas estrategias, pero resultó que la victoria final fue para la más sencilla de las estrategias presentadas. Esta estrategia se llama "Toma y daca" (Tit-for-Tat). Comienza cooperando; después repite siempre la jugada anterior del otro.

Vale la pena señalar que el jugador que aplique "toma y daca" jamás irá de primero en ninguna fase del juego reiterado, pues es siempre el último en defraudar. A pesar de ello, el jugador "toma y daca" puede ganar el campeonato, porque el "dilema del preso" no es un juego de suma cero: siempre es posible obtener puntos sin tener que quitárselos a otros. Merced a la transparencia de su conducta, "toma y daca" logra muchas veces persuadir a sus oponentes de que la cooperación es rentable. En los campeonatos de Axelrod, la estrategia "toma y daca" (presentada por Anatol Rapoport, un especialista en teoría de juegos) suscitó muchas rondas de remuneradora cooperación, mientras que otros jugadores se empantanaban, a veces consigo mismos, en largas series de defección.

Siendo ganadora del campeonato, "toma y daca" obtuvo en la generación siguiente mayor número de representantes que otras estrategias. Además, los jugadores que habían cooperado propendieron a recibir más descendencia que quienes no lo hicieron. "Toma y daca" fue moldeando en cada generación un ambiente más proclive. Las estrategias que expoliaban sin piedad a los cooperadores solamente tuvieron éxito hasta el agotamiento de sus propios recursos.

Adversarios impredictibles

Hemos realizado recientemente simulaciones computarizadas con un sistema generalizado de estrategias que fundan su próxima jugada en los resultados de la ronda anterior, en vez de basarse solamente en

MARTIN A. NOWAK, ROBERT M. MAY y KARL SIGMUND han sometido a comprobación cierto número de ejemplos de cooperación y competición en su respectivo ámbito de trabajo. Nowak, investigador en el Wellcome Trust, enseña zoología en el Colegio Keble de la Universidad de Oxford. May es profesor de investigación de la Regia Sociedad en la Universidad de Oxford y en el Colegio Imperial de Londres. Sigmund da clases en el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Viena. Los tres investigan modelos matemáticos orientados hacia una amplia variedad de problemas de la biología evolutiva. May y Sigmund han escrito varios libros cada uno; Nowak sólo presume de haberlos leído.

la anterior jugada de su adversario (como hace "toma y daca"). Una estrategia dependiente de los resultados anteriores tiene que determinar qué respuesta dará en cuatro eventualidades: tentación, recompensa, castigo o pérdida. Como cada una de éstas admite dos respuestas posibles, hay 16 tipos de posibles jugadores.

Introdujimos, además, estrategias "estocásticas" que responden a los cuatro resultados posibles modificando solamente su propensión estadística a la cooperación. Tales estrategias no están obligadas a responder siempre de igual manera ante un resultado dado. Cierto tipo de jugador estocástico podría, por ejemplo, cooperar en el 90 por ciento de las veces tras recibir la recompensa. Tal incertidumbre remeda los inevitables errores que se producen en las interacciones reales.

La inclusión de respuestas aleatorias desembocó en una enorme variedad de posibilidades. Nuestro ordenador buscó el más afortunado de estos jugadores mediante simulación de las fuerzas de la selección natural, añadiendo a cada centésima generación una pequeña dosis de estrategia nueva, seleccionada al azar. Le seguimos la pista a muchas de tales rondas de selección por mutación, no a causa de que el seguimiento de la cooperación necesitase de tantas iteraciones, sino porque de esta manera podíamos poner a prueba un grandísimo número de posibles estrategias.

A pesar de la rica diversidad que mostraban estas crónicas, nos vimos invariablemente conducidos hasta ciertos resultados sencillos y claros. El primero es que el pago medio de la población puede cambiar repentinamente. De hecho, el comportamiento que descubrimos constituye un paradigma de la hipótesis de la evolución biológica por equilibrios puntuales. Ocurría que, durante la mayor parte del tiempo, o bien casi todos los miembros cooperaban, o bien casi todos explotaban. Las transiciones entre estos dos regímenes son por lo general raras y abruptas, y se producen en sólo unas cuantas generaciones. Descubrimos que, al ir avanzando la simulación, los períodos de estabilidad tendían a durar más. Y se apreciaba un sesgo decidido hacia la cooperación. Cuanto más tiempo se permitía que evolucionase el sistema, mayor era la probabilidad de florecimiento de un régimen cooperativo. Pero la amenaza de un desplome súbito persistía siempre.

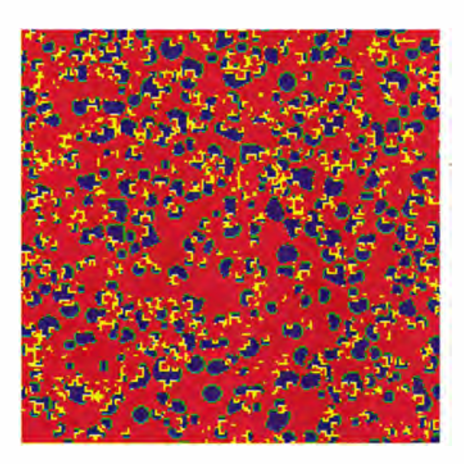
Las poblaciones cooperativas quedan a veces dominadas por una estrategia denominada "Toma y daca generosa", variante que en ocasiones ofrece cooperación en respuesta a la defección del otro. Pero era mucho más frecuente que acabase por reinar una estrategia de "Pavlov", debida a los matemáticos David P. Kraines, de la Universidad Duke, y Vivian Kraines, del Colegio Meredith en Raleigh, Carolina del Norte.

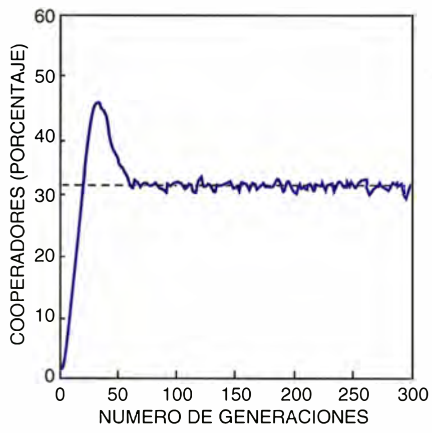
Tras disfrutar de la recompensa por cooperación mutua, el jugador "pavloviano" repite su jugada cooperativa anterior. Análogamente, si sale bien librado de una defección unilateral por su parte, vuelve a repetir esta última jugada. Pero una vez castigado con la defección del otro, Pavlov opta por cooperar. Y cuando recibe el "pago del timado" por haber cooperado unilateralmente, reacciona con la defección. En breve, la regla de Pavlov manda atenerse a la jugada anterior si le reportó una ganancia elevada (la recompensa o la de la tentación) y cambiarla si la remuneración fue baja (el castigo o el pago por dejarse timar).

Este principio de "ganar-seguir, perder-cambiar" parece funcionar bien en muchas otras situaciones. Es tenida por fundamental en psicología animal: las ratas se muestran dispuestas a repetir acciones que les reportan una recompensa, mientras que tienden a abandonar conductas de consecuencias dolorosas. Esta misma y burda aplicación del método de "palo y caramelo" está implícita en casi todos los métodos de educación infantil.

En el caso del "dilema reiterado del preso", la represalia tras haber sido explotado suele ser tenida como prueba de comportamiento similar al "toma y daca", pero es igualmente válida para jugadores que se atienen a Pavlov. Una sociedad de estrategas pavlovianos es muy estable frente a errores. Una defección cometida por error entre dos miembros conduce a una ronda de defección mutua y vuelve después a la cooperación. Pero enfrentado a un jugador que no devuelve el golpe, el jugador Pavlov proseguirá con la defección. Este comportamiento hace difícil que los cooperadores a ultranza lleguen a encontrar asidero en la comunidad. Por contra, una sociedad de "toma y daca" generoso no discrimina a los cooperadores incondicionales. Esta benevolencia resulta onerosa a la larga, porque los jugadores que no toman represalias pueden difundirse por la población y, al consentir que los explotadores medren, acaban socavando la cooperación.

Aunque Pavlov constituye una estrategia adecuada para impedir que los explotadores invadan una sociedad cooperativa, se desenvuelve mal entre no-cooperadores. Enfrentado a la defección permanente, por ejemplo, intenta reanudar la cooperación en una de cada dos jugadas. En los torneos de Axelrod, Pavlov se hubiera clasificado hacia la cola de la tabla. Las ventajas de Pavlov solamente resultan visibles después de que otras estrategias menos tolerantes hayan abierto el camino y guiado a la cooperación lejos de la defección.





5. LOS JUEGOS ESPACIALES del "dilema del preso" hacen ver la evolución de un casillero de jugadores, donde cada uno interactúa solamente con los situados en ocho cuadrados vecinos. La proporción de población compuesta por cooperadores va tendiendo gradualmente

Cooperación innata

Podemos concluir sin temor que la aparición y persistencia del comportamiento cooperativo no son en modo alguno inverosímiles, siempre y cuando los participantes se encuentren repetidamente, se reconozcan unos a otros y recuerden los resultados de pasadas interacciones. Estas circunstancias se dan de forma obvia en la vida familiar o profesional, pero en el mundo de los seres vivos, mucho más amplio, dichos requisitos



hacia un valor estable tras muchas generaciones de juego (*abajo, a la izquierda*). En una "instantánea" tomada tras 50 generaciones *(arriba, izquierda)*, cada casilla azul contiene un cooperador que había sido cooperador en la ronda anterior; las verdes, cooperadores que previamente defraudaron; las rojas, defraudadores que defraudaron; las amarillas, defraudadores que antes colaboraron. Si las condiciones iniciales son simétricas, el juego espacial puede generar motivos que recuerdan a una alfombra persa (*arriba*).

exigen elevado refinamiento. A pesar de ello, observamos la cooperación incluso entre organismos sencillos carentes de tales facultades. Además, las estrategias mencionadas sólo funcionarán si las ventajas de futuros encuentros no sufren excesivo descuento al compararlos con las ganancias del presente. Lo mismo que antes, esta expectativa puede parecer razonable para muchas de las actividades que desarrollan los humanos; ahora bien, para la mayoría de los organismos más sencillos, los pagos aplazados en forma de ventaja reproductiva en el futuro pueden contar muy poco: si la vida es breve e imprevisible, la presión evolutiva para efectuar inversiones a largo plazo es escasa.

Mas, ¿qué decir de criaturas, como es el caso de muchos invertebrados, que parecen exhibir formas de cooperación recíproca, a pesar incluso de que con frecuencia son incapaces de reconocer a jugadores individuales o recordar sus acciones? ¿Y qué sucede si los pagos futuros sufren fuertes descuentos? ¿Cómo es posible establecer y mantener en estas circunstancias relaciones altruistas? Una posible solución es que estos jugadores encuentren una colección fija de congéneres participantes y se aseguren de que el juego se desarrolle en gran medida con ellos. Esta selectividad será, en general, difícil de alcanzar. Pero existe una circunstancia en la que no sólo es fácil, sino automática: si los jugadores ocupan puestos fijos y si solamente interactúan con los vecinos cercanos, no habrá necesidad de reconocer y recordar, porque los otros jugadores están determinados por su situación espacial. Aunque en muchas de nuestras simulaciones los jugadores encuentran siempre una muestra representativa de la población, también hemos examinado supuestos específicos en los que cada jugador interactúa sólo con unos cuantos vecinos de un cuadriculado bidimensional. Estos "juegos espaciales" son muy recientes y confieren al dilema del preso un giro totalmente nuevo.

Anclados en Planilandia

No debería causar sorpresa que la cooperación resulte más fácil de sostener en una población sedentaria: los defraudadores pueden medrar entre una multitud anónima; entre vecinos, en cambio, es frecuente la ayuda mutua. Esta idea está suficientemente clara. Pero en muchos casos, las interacciones estructuradas por el territorio promueven la cooperación, a pesar incluso de que no sean de esperar encuentros posteriores; favorece la cooperación incluso en partidas a una sola vuelta del "dilema del preso", donde en apariencia no hay tal esperanza.

Fijémonos en una versión del torneo especialmente estricta, en la que cada miembro de la población reside en una casilla de una especie de tablero de ajedrez de gran tamaño. Cada jugador es, ora cooperador puro, ora defraudador, y solamente interactúa con sus ocho vecinos inmediatos, jugando con cada uno una partida del dilema del preso. En la generación siguiente, la casilla es heredada por quien haya totalizado máxima puntuación.

Un cooperador solitario será expoliado por los abusones que le rodean y sucumbirá. En cambio, es concebible que cuatro cooperadores, apiñados formando un cuadrado, logren conservar sus posiciones, porque cada uno interactúa con tres cooperadores: un defraudador situado en la periferia sólo puede alcanzar o abusar de dos, como máximo. Si la bonificación por defraudar no es demasiado grande, los apiñamientos de cooperadores irán creciendo. Recíprocamente, los defraudadores solitarios también prosperarán, porque estarán rodeados por cooperadores a los que explotar. Pero al difundirse, los defraudadores son rodeados por congéneres y ven reducida su remuneración.

La evolución real de tales sistemas espaciales depende del importe de los pagos. Ciertamente, es posible que los cooperadores queden barridos del tablero. Pero es frecuente que encontremos una variedad de mosaicos que van evolucionando, en los que sobreviven ambas estructuras. Las mezcolanzas de cooperadores y defraudadores puros pueden coexistir indefinidamente en proporciones fluctuantes, pero la composición media de la población a largo plazo es predecible. Esta conclusión es de una robustez notable. Subsiste, en sus rasgos esenciales, tomando otras configuraciones e incluso para formaciones irregulares o aleatorias. Lo que importa es que ningún jugador haya de interac-

tuar con excesivo número de vecinos.

Pese a su sencillez, las reglas de estos juegos espaciales definen dinámicas de mareante complejidad. Dan lugar a motivos erráticos por el tablero, que van recuperando periódicamente sus formas originales. Pueden también exhibir configuraciones que crezcan sin límite. Algunas de estas peculiaridades se asemejan a los resultados del juego "Vida", de John Horton Conway, un sistema para construir mediante reglas sencillas motivos espaciales evolutivos que remedan organismos regenerativos. Puede muy bien ocurrir que los resultados generados por cualquiera de nuestras versiones espaciales del "dilema del preso" —trátese de configuraciones irregulares o de simétricas alfombras persas— sean intrínsecamente impredictibles y caóticas, en el sentido de que ningún algoritmo puede predecir qué ocurrirá. Tal vez matemáticos más perspicaces alcancen a idear formas de determinar las configuraciones futuras. Nosotros nos conformamos con observar el despliegue de los arabescos [véase "Taller y laboratorio", por Alun L. Lloyd, en este mismo número].

Así es la vida

A lo largo de la historia evolutiva de la vida, la cooperación entre pequeñas unidades desembocó en la aparición de estructuras más complejas, como, por ejemplo, la aparición de seres multicelulares a partir de organismos unicelulares. En este sentido, la cooperación resulta tan esencial para la evolución como la competencia.

Las estructuras espaciales actúan, en particular, protegiendo la diversidad. Permiten que cooperadores y defraudadores coexistan unos al lado de otros. En un contexto diferente aunque relacionado, configuraciones espaciales similares permiten la supervivencia conjunta de poblaciones de huéspedes y parásitos, de presas y depredadores, a pesar de la inestabilidad intrínseca de sus interacciones.

Las estrategias cooperativas de este jaez pudieron haber sido cruciales para la evolución prebiótica, que en opinión de muchos investigadores tal vez acontecieran sobre superficies y no en disoluciones bien agitadas. La catálisis de la replicación de una molécula constituye una forma de ayuda mutua; en consecuencia, una cadena de catalizadores, en la que cada eslabón ejerce realimentación sobre sí mismo, hubiera constituido el más temprano ejemplo de mutualismo [véase "Origen de la información genética", por Manfred Eigen, William Gardiner, Peter Schuster y Ruthild Winkler-Oswatitsch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1981].

Las reacciones químicas cooperativas hubieran sido vulnerables ante mutantes moleculares "tramposos" que tomasen para sí más ayuda catalítica de la que dieran. Se pensaba que tales dificultades zanjaban muchas ideas sobre evolución prebiótica basadas en cadenas cooperativas. Pero Maarten C. Boerlijst y Pauline Hogeweg, de la Universidad de Utrecht, han demostrado hace poco, mediante simulaciones informáticas, que estructuras espaciales autogeneradas, afines a las que nosotros hemos ideado, pueden poner coto a la difusión de moléculas parásitas destructivas.

Nuestros modelos, por burdos que sean, ilustran el mecanismo verosímil en virtud del cual pudo surgir la cooperación y mantenerse en sistemas biológicos reales. Cabe diseñar refinadas criaturas que incentiven la cooperación por repetidas interacciones entre individuos capaces de reconocerse y recordarse unos a otros. En los organismos más sencillos, sin embargo, la cooperación persiste, posiblemente merced a estructuras espaciales auto-organizadas y generadas a través de interacciones con vecinos inmediatos de una cierta disposición espacial fija. Parece que en el curso de la evolución ha habido abundante ocasión para que la cooperación viniera en ayuda de todas las cosas, desde los humanos hasta las moléculas. En cierto sentido, la cooperación pudiera ser más antigua que la vida misma.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LA EVOLUCIÓN DE LA COOPERACIÓN, Robert Axelrod. Alianza Editorial. Madrid, 1984.

TIT-FOR-TAT IN HETEROGENEOUS POPULATIONS, Martin A. Nowak y Karl Sigmund, en *Nature*, vol. 355, n.º 6357, páginas 250-253; 16 de enero de 1992.

EVOLUTIONARY GAMES AND SPATIAL CHAOS. Martin A. Nowak y Karl Sigmund, en *Nature*, vol. 359, n.º 6398, páginas 226-229; 29 de octubre de 1992.

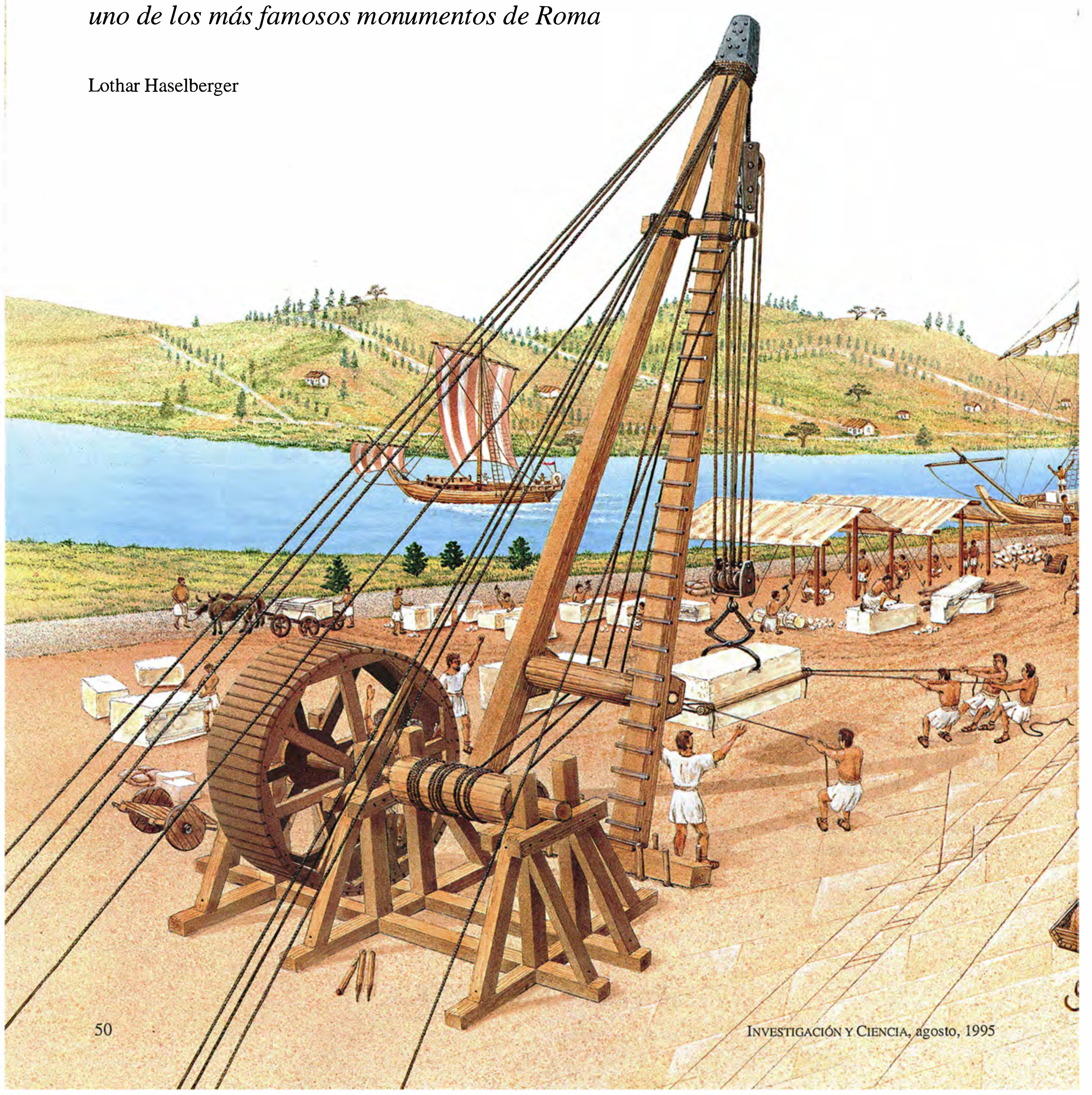
A STRATEGY OF WIN-STAY, LOSE-SHIFT THAT OUTPERFORMS TIT-FOR-TAT IN THE PRISONER'S DILEMMA GAME, Martin A. Nowak y Karl Sigmund, en *Nature*, vol. 364, n.º 432, págs. 56-58; 1 de julio de 1993

GAMES OF LIFE: EXPLORATIONS IN ECOLOGY, EVOLUTION, AND BEHAVIOUR. Karl Sigmund. Penguin, 1995.

Descifrando un plano romano

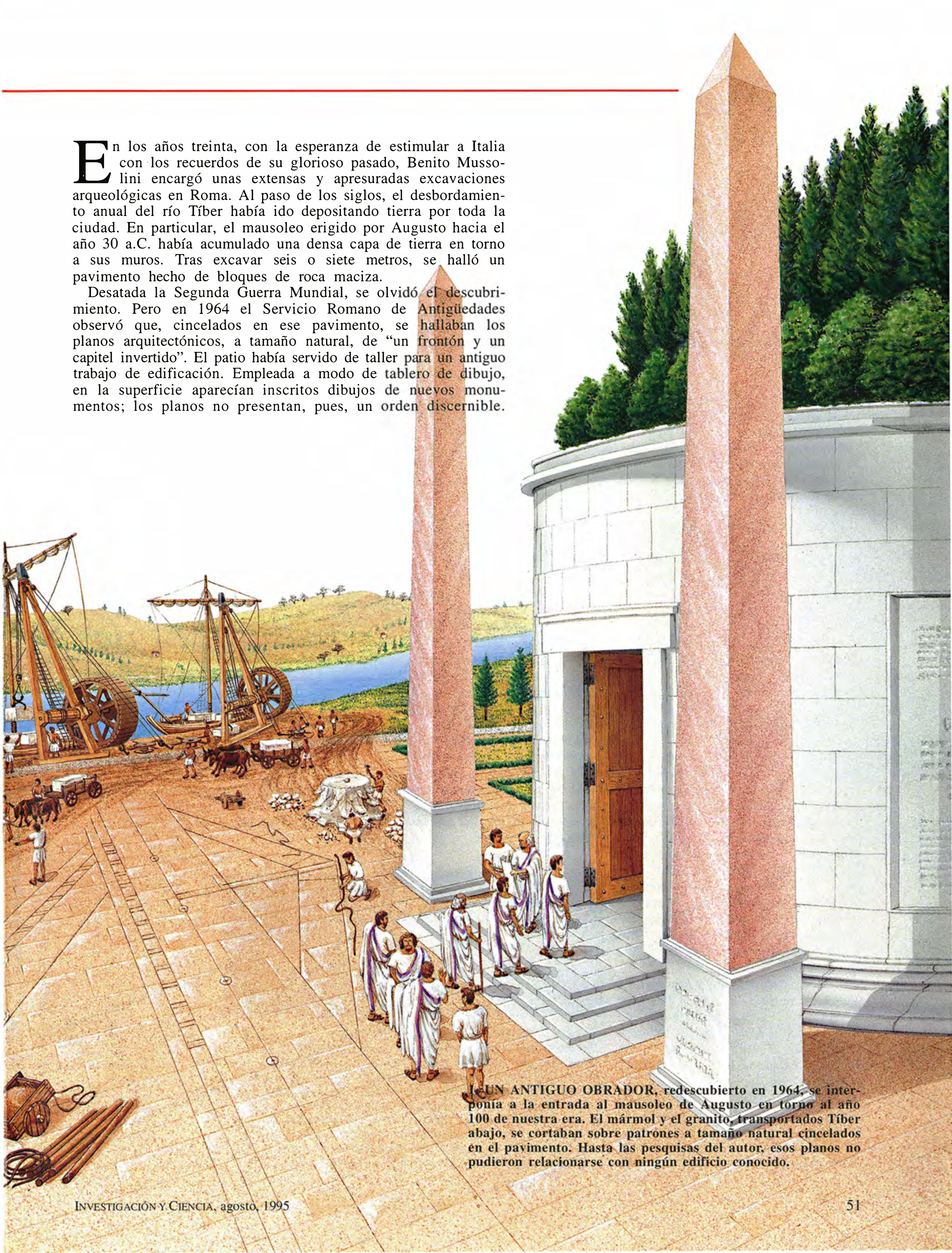
Un trabajo de arquitectura histórica, a medio camino entre el rigor académico y el método policial, revela el secreto de un plano a tamaño natural cincelado en un antiguo pavimento. Este "plano" describe uno de los más famosos monumentos de Roma

Lothar Haselberger

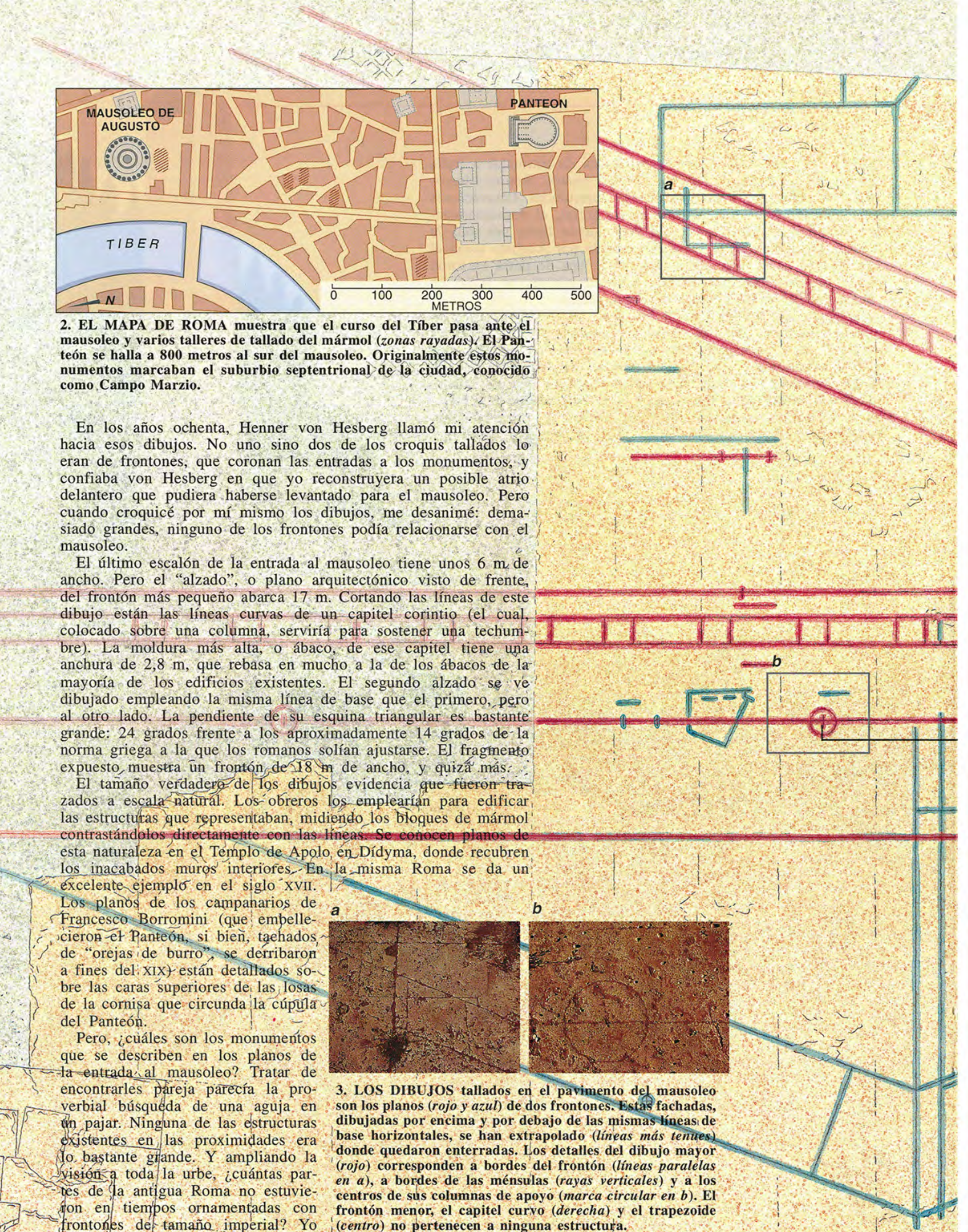


En los años treinta, con la esperanza de estimular a Italia con los recuerdos de su glorioso pasado, Benito Mussolini encargó unas extensas y apresuradas excavaciones arqueológicas en Roma. Al paso de los siglos, el desbordamiento anual del río Tíber había ido depositando tierra por toda la ciudad. En particular, el mausoleo erigido por Augusto hacia el año 30 a.C. había acumulado una densa capa de tierra en torno a sus muros. Tras excavar seis o siete metros, se halló un pavimento hecho de bloques de roca maciza.

Desatada la Segunda Guerra Mundial, se olvidó el descubrimiento. Pero en 1964 el Servicio Romano de Antigüedades observó que, cincelados en ese pavimento, se hallaban los planos arquitectónicos, a tamaño natural, de "un frontón y un capitel invertido". El patio había servido de taller para un antiguo trabajo de edificación. Empleada a modo de tablero de dibujo, en la superficie aparecían inscritos dibujos de nuevos monumentos; los planos no presentan, pues, un orden discernible.



1. UN ANTIGUO OBRADOR, redescubierto en 1964, se interponía a la entrada al mausoleo de Augusto en torno al año 100 de nuestra era. El mármol y el granito, transportados Tíber abajo, se cortaban sobre patrones a tamaño natural cincelados en el pavimento. Hasta las pesquisas del autor, esos planos no pudieron relacionarse con ningún edificio conocido.



2. EL MAPA DE ROMA muestra que el curso del Tíber pasa ante el mausoleo y varios talleres de tallado del mármol (*zonas rayadas*). El Panteón se halla a 800 metros al sur del mausoleo. Originalmente estos monumentos marcaban el suburbio septentrional de la ciudad, conocido como Campo Marzio.

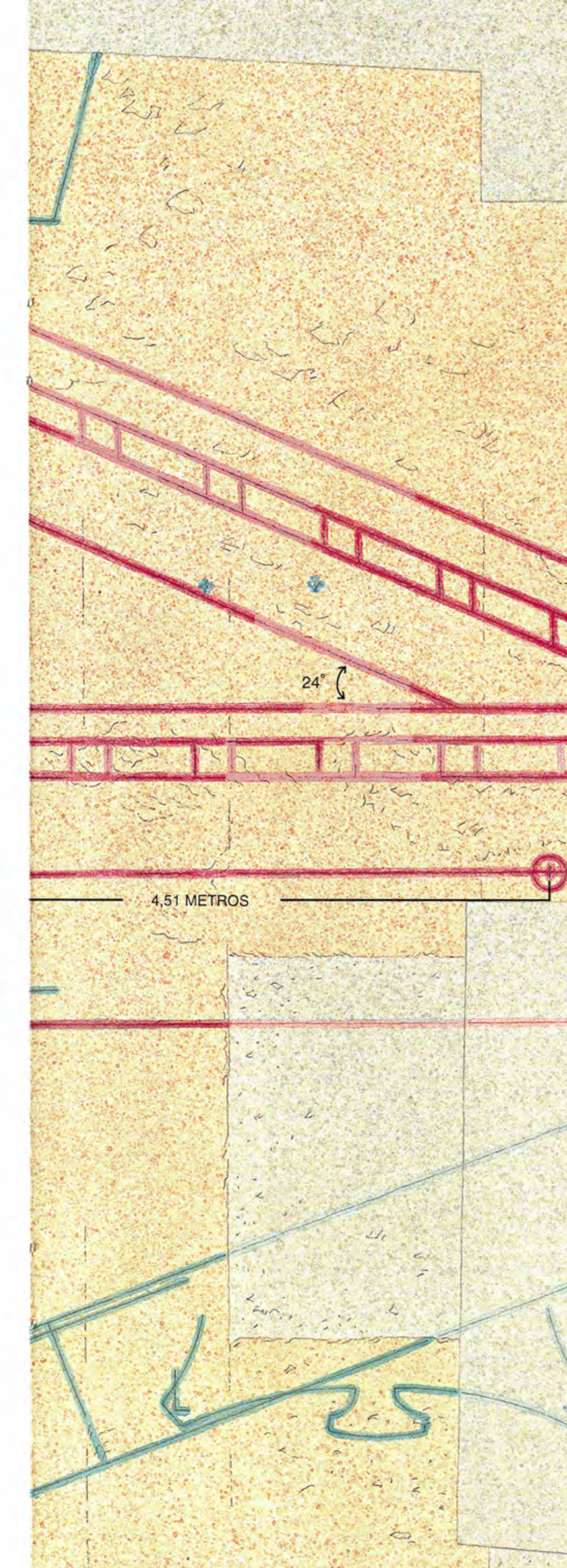
En los años ochenta, Henner von Hesberg llamó mi atención hacia esos dibujos. No uno sino dos de los croquis tallados lo eran de frontones, que coronan las entradas a los monumentos, y confiaba von Hesberg en que yo reconstruyera un posible atrio delantero que pudiera haberse levantado para el mausoleo. Pero cuando croquicé por mí mismo los dibujos, me desanimé: demasiado grandes, ninguno de los frontones podía relacionarse con el mausoleo.

El último escalón de la entrada al mausoleo tiene unos 6 m de ancho. Pero el "alzado", o plano arquitectónico visto de frente, del frontón más pequeño abarca 17 m. Cortando las líneas de este dibujo están las líneas curvas de un capitel corintio (el cual, colocado sobre una columna, serviría para sostener una techumbre). La moldura más alta, o ábaco, de ese capitel tiene una anchura de 2,8 m, que rebasa en mucho a la de los ábacos de la mayoría de los edificios existentes. El segundo alzado se ve dibujado empleando la misma línea de base que el primero, pero al otro lado. La pendiente de su esquina triangular es bastante grande: 24 grados frente a los aproximadamente 14 grados de la norma griega a la que los romanos solían ajustarse. El fragmento expuesto muestra un frontón de 18 m de ancho, y quizá más.

El tamaño verdadero de los dibujos evidencia que fueron trazados a escala natural. Los obreros los emplearían para edificar las estructuras que representaban, midiendo los bloques de mármol contrastándolos directamente con las líneas. Se conocen planos de esta naturaleza en el Templo de Apolo en Dídyma, donde recubren los inacabados muros interiores. En la misma Roma se da un excelente ejemplo en el siglo XVII. Los planos de los campanarios de Francesco Borromini (que embellecieron el Panteón, si bien, tachados de "orejas de burro", se derribaron a fines del XIX) están detallados sobre las caras superiores de las losas de la cornisa que circunda la cúpula del Panteón.

Pero, ¿cuáles son los monumentos que se describen en los planos de la entrada al mausoleo? Tratar de encontrarles pareja parecía la proverbial búsqueda de una aguja en un pajar. Ninguna de las estructuras existentes en las proximidades era lo bastante grande. Y ampliando la visión a toda la urbe, ¿cuántas partes de la antigua Roma no estuvieron en tiempos ornamentadas con frontones de tamaño imperial? Yo

3. LOS DIBUJOS tallados en el pavimento del mausoleo son los planos (*rojo y azul*) de dos frontones. Estas fachadas, dibujadas por encima y por debajo de las mismas líneas de base horizontales, se han extrapolado (*líneas más tenues*) donde quedaron enterradas. Los detalles del dibujo mayor (*rojo*) corresponden a bordes del frontón (*líneas paralelas en a*), a bordes de las ménsulas (*rayas verticales*) y a los centros de sus columnas de apoyo (*marca circular en b*). El frontón menor, el capitel curvo (*derecha*) y el trapezoide (*centro*) no pertenecen a ninguna estructura.



no creo en el manido procedimiento de conectar todo nuevo hallazgo con las escasas estructuras conocidas de los tiempos clásicos. Se consigue así una impresión aparentemente muy coherente, aunque en su mayor parte no es más que especulación.

Tal como resultó la cosa, mi pesimismo estaba fuera de lugar. En aquellos momentos ya había algo claro. Los planos, aunque antiguos (ello lo evidenciaban los seis metros de tierra bajo los que yacían), databan de una época posterior a Augusto. El pavimento linda con la escalera que conduce al mausoleo, y se halla al mismo nivel que el primer escalón de mármol. Como las escaleras no suelen construirse a ras del suelo, comprendí que el pavimento con las inscripciones no podía ser el original. De hecho, los informes de las excavaciones de 1938 revelaron que la base de los muros del mausoleo se encuentra 1,7 m por debajo de ese pavimento.

A medida que el Tíber depositaba su lodo una y otra vez, el mausoleo debió de adquirir al menos tres pavimentos: el original, aún enterrado; el "tablero de dibujo", a 1,7 metros por encima; y un tercero, de adoquín moderno, desmontado en los años treinta. El patio con las inscripciones está al mismo nivel que otros pavimentos construidos en esa área, Campo Marzio, en torno al 100 d.C.

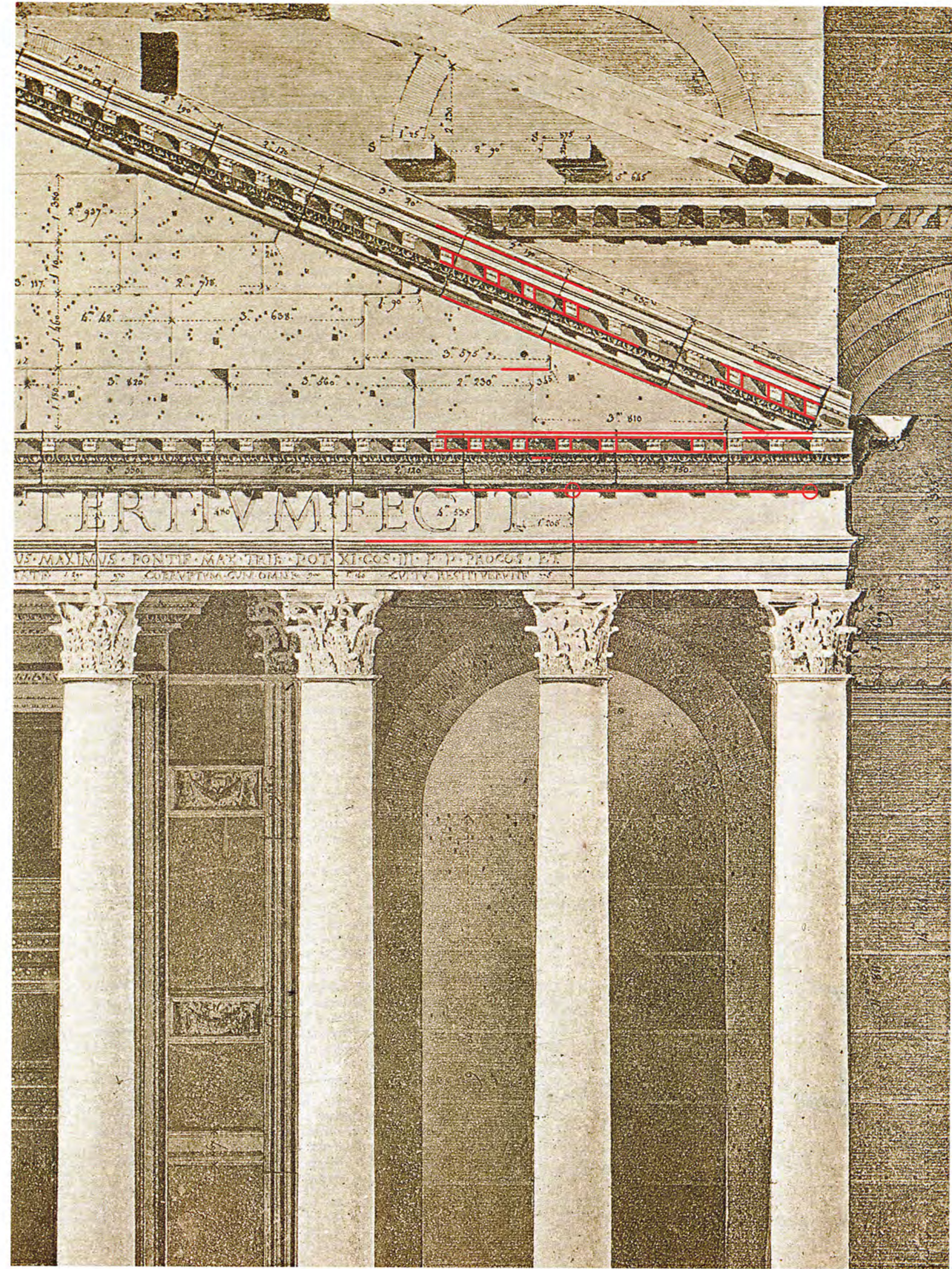
Una fecha tan posterior a Augusto planteó otra cuestión. El mausoleo, rodeado de parques cuidadosamente diseñados y ornamentado con obeliscos en honor del divino Augusto, era un grandioso monumento dinástico. Si aquella tumba no estaba bajo el patrocinio de Augusto, ¿quién habría osado emplear la explanada como obrador? No cabe duda de que se trataba de propiedad imperial. Debió de ser uno de los últimos emperadores en persona, o alguien con su aprobación, quien la destinó a oficina de proyectos.

En ese estado dejé el problema en 1985. En la primavera de 1992 impartí un seminario acerca del Panteón, templo que ha sido calificado de pináculo de la arquitectura romana. Cierta noche de verano del mismo año, mientras regresaba a casa paseando a lo largo de un arroyo silvestre, mis pensamientos se tornaron hacia los planos que habían estado recogiendo polvo en mis cajones. Por disparatado que pareciera, los dibujos se asemejarían, a buen seguro, a la fachada del Panteón. "Convendría que hiciera una comparación detallada," le dije a mi esposa después de cenar, "aunque sólo sea como diversión."

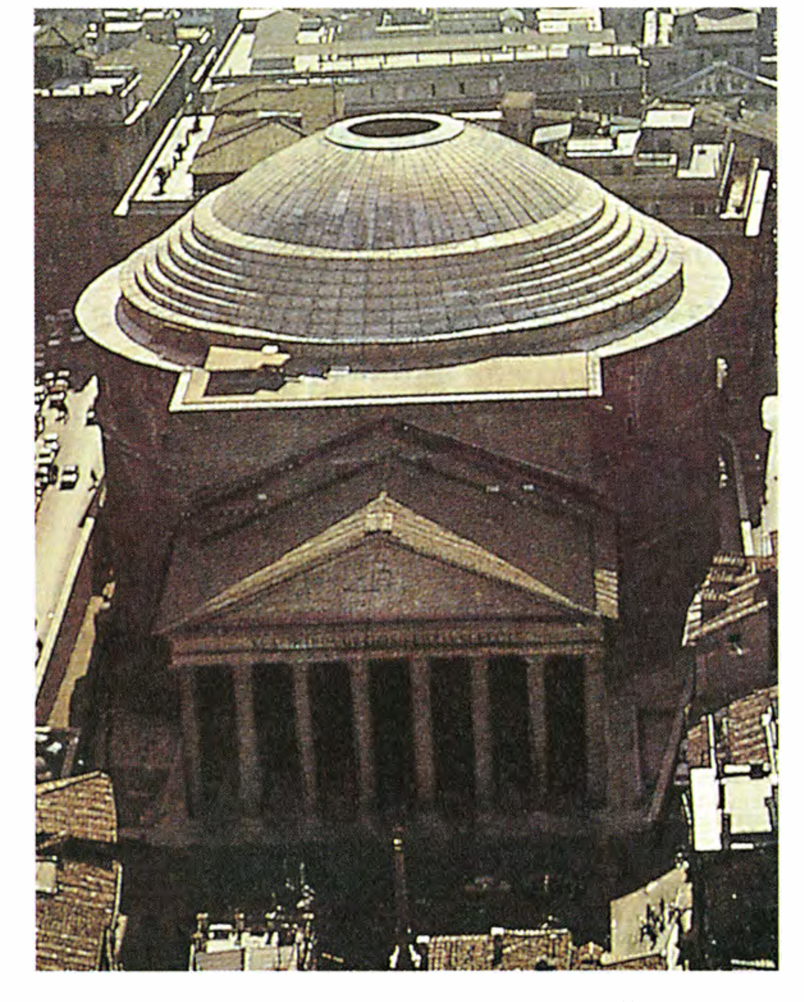
Pero, por mucho que lo intenté, no hallé ningún dibujo cabal del frontón del Panteón. Tras algunos esfuerzos localicé un dibujo acotado trazado en 1813 por el arquitecto francés Achille Leclère. Pero no indicaba las medidas con la precisión suficiente, así que seguí buscando. Con tenacidad, a partir de un volumen británico de 1821, un estudio americano de 1924 y un trabajo danés de 1968, recogí información acerca de diversos aspectos de la fachada. Cuando al fin casé las piezas que definían las dimensiones básicas, me estremecí. La coincidencia con el alzado mayor era asombrosa.

El estudio danés cifra la insólita pendiente del frontón en "unos 23 grados"; el plano de construcción, ya lo advertimos, presenta 24 grados. Las ménsulas, o soportes en los que descansan las cornisas superior e inferior, así como la altura de un friso horizontal, se ajustan al plano en menos de un centímetro. (La distancia media entre ménsulas es de 82 cm; el alzado tiene 81 cm.) La distancia media entre centros de las imponentes columnas es de 4,52 m; el dibujo indica 4,51 m. Las posiciones de las dos columnas más cercanas a la esquina coinciden con dos señales marcadas con un círculo en el alzado. Incluso una línea horizontal donde van a encontrarse dos hileras de bloques aparece indicada en el plano de construcción.

Está claro que el plano se empleó para construir la imponente fachada del Panteón. Este fue encargado por Trajano o por su sucesor, Adriano, quien lo terminó en torno al 120 d.C. (De un Panteón anterior en el mismo emplazamiento sólo se han encontrado algunos bloques de la cimentación.) Consagrado al cristianismo en el año 609, el Panteón sigue abierto como templo, al que acuden millares de fieles y donde están enterrados ciudadanos egregios de Italia, el pintor Rafael entre ellos.


TERTIVM FECIT





4. EL DIBUJO del Panteón (*página precedente*) realizado por Achille Leclère ofrece las dimensiones de su fachada más precisas medidas hasta la fecha. El alzado de mayor tamaño inscrito en el pavimento del mausoleo (*rojo*) se ha sobrepuesto a la ilustración que data de 1813. La fuerte pendiente del frontón coincide con el plano en menos de un grado; los contornos de las cornisas, las posiciones de columnas y ménsulas e incluso el canto de una alineación de bloques encajan por menos de un centímetro. Para comprobar si el alzado coincide con mayor precisión aún con el Panteón (*izq., al lado*), los investigadores tendrán que volver a medir la fachada (*abajo*).

El obrador imperial donde se cortaron los bloques del edificio (o sea, la entrada al mausoleo) se encuentra a 800 m del emplazamiento del Panteón. Lo incómodo de la distancia debía de compensarlo la presencia del río Tíber, por donde llegaba embarcado el mármol. Los bloques se descargaban, se cortaban y se transportaban en carretas a pie de obra. Transportar rocas de toneladas de peso, hay que decirlo, no planteaba problemas a la tecnología romana. Los numerosos obeliscos que adornan Roma (bloques graníticos de una sola pieza de hasta 33 m de altura) procedían de Egipto. El Panteón está adornado con preciosas y coloridas piedras que llegaban desde los más remotos rincones del imperio y que incluso constituyen un catálogo que denota su extensión.



Amén de la logística de la arquitectura romana, el alzado revela su estética. Las tres dimensiones elementales de la fachada del Panteón —diámetro de las columnas (1,495 m más o menos dos centímetros); la "luz", o separación entre columnas (3,02 m más o menos tres centímetros); y la altura de las columnas (14,14 m más o menos un centímetro— guardan la proporción 1:2:9,5.

Esta fórmula se encuentra entre las que describe Hermógenes, arquitecto de la era helenística, como definitorias de una fachada ideal. (Sus ideas nos han llegado gracias a Vitrubio, ingeniero y teórico del siglo I a.C.). Por primera vez en la investigación de la arquitectura romana, ha sido posible ligar a un monumento existente una fórmula canónica de armonía, tal como fue transmitida por una fuente textual. Cada vez que visitan el mausoleo de Augusto, turistas y estudiosos pisan sobre este registro de las exquisitas proporciones del Panteón.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ROTUNDA IN ROME—A STUDY OF HADRIAN'S PANTHEON. Kjeld de Fine Licht. Jutland Archaeological Society Publications VIII. Nordisk Forlag, Copenhague, 1968.

EIN GIEBELRISS DER VORHALLE DES PANTHEON: DIE WERKRISSE VOR DEM AUGUSTUSMAUSOLEUM. Lothar Haselberger en *Mitteilungen des Deutschen Archaeologischen Instituts, Roemische Abteilung*, vol. 101. Verlag Philipp von Zabern, Maguncia, 1994.

LOTHAR HASELBERGER ocupa la cátedra Morris Russell Williams y Josephine Chidsey Williams de arquitectura romana en la Universidad de Pennsylvania.

Núcleos con halo

Los núcleos que tienen un exceso de neutrones o de protones muestran un comportamiento vacilante en las "líneas de las gotas", los bordes de la estabilidad nuclear. Bajo esta tensión, algunos desarrollan un halo

Sam M. Austin y George F. Bertsch

A lo largo de los últimos cincuenta años los físicos se han venido representando el núcleo atómico —hecho de protones y neutrones— a la manera de una gota líquida de superficie bien definida. Pero esto no siempre es así. Los investigadores de un puñado de laboratorios han observado recientemente una estructura del todo insólita: en ciertos núcleos, algunos de los neutrones o de los protones constituyentes se aventuran más allá de la superficie de la gota y forman una niebla, o halo, de un modo muy similar a como los electrones crean nubes alrededor de los núcleos y construyen átomos. A nadie sorprende que tales núcleos prolongados presenten un comportamiento muy distinto del que caracteriza a los átomos ordinarios. Cuesta excitar o descomponer un núcleo normal; por contra, los núcleos con halo son objetos frágiles. Mayores que los núcleos normales, interaccionan con ellos más fácilmente. La verdad es que el halo constituye un fenómeno cuántico que no obedece las leyes de la física clásica. Por consiguiente, los núcleos que lo portan podrían quizás arrojar luz nueva sobre uno de los misterios centrales de la física: el enlace nuclear.

Desde hace mucho tiempo, los físicos vienen dándole vueltas a las combinaciones posibles de neutrones y protones, o nucleones, capaces de asentarse y constituir un núcleo. Este equilibrio depende, hasta extremos sutiles, de la diversa implicación de muchos neutrones y protones, así como de las fuerzas que median entre ellos. Todos los nucleones se atraen mutuamente, pero sólo los protones y los neutrones pueden enlazarse entre sí y formar pares, los deuterones. La consecuencia es que únicamente los núcleos que contengan un número casi igual de neutrones y protones serán lo bastante estables para que se produzcan de forma natural en la Tierra.

También existen núcleos que portan números desiguales de neutrones y protones, pero su vida media está limitada. Aunque se hallan enlazados —es decir, aunque retirar uno de sus nucleones requiera energía—, no son estables. La radiactividad beta puede convertirlos en una especie más estable mediante la transformación de algunos de sus neutrones en protones, o viceversa. Algunas de estas transiciones ocurren en cuestión de milisegundos, otras sólo en un plazo de millones de años. Mas, en general, si se representan en un gráfico los núcleos de forma que el número de protones aparezca a lo largo de uno de los ejes y el de neutrones a lo largo del otro, los que más lejos estén de la diagonal tendrán vidas medias más cortas [*véase la figura 1*].

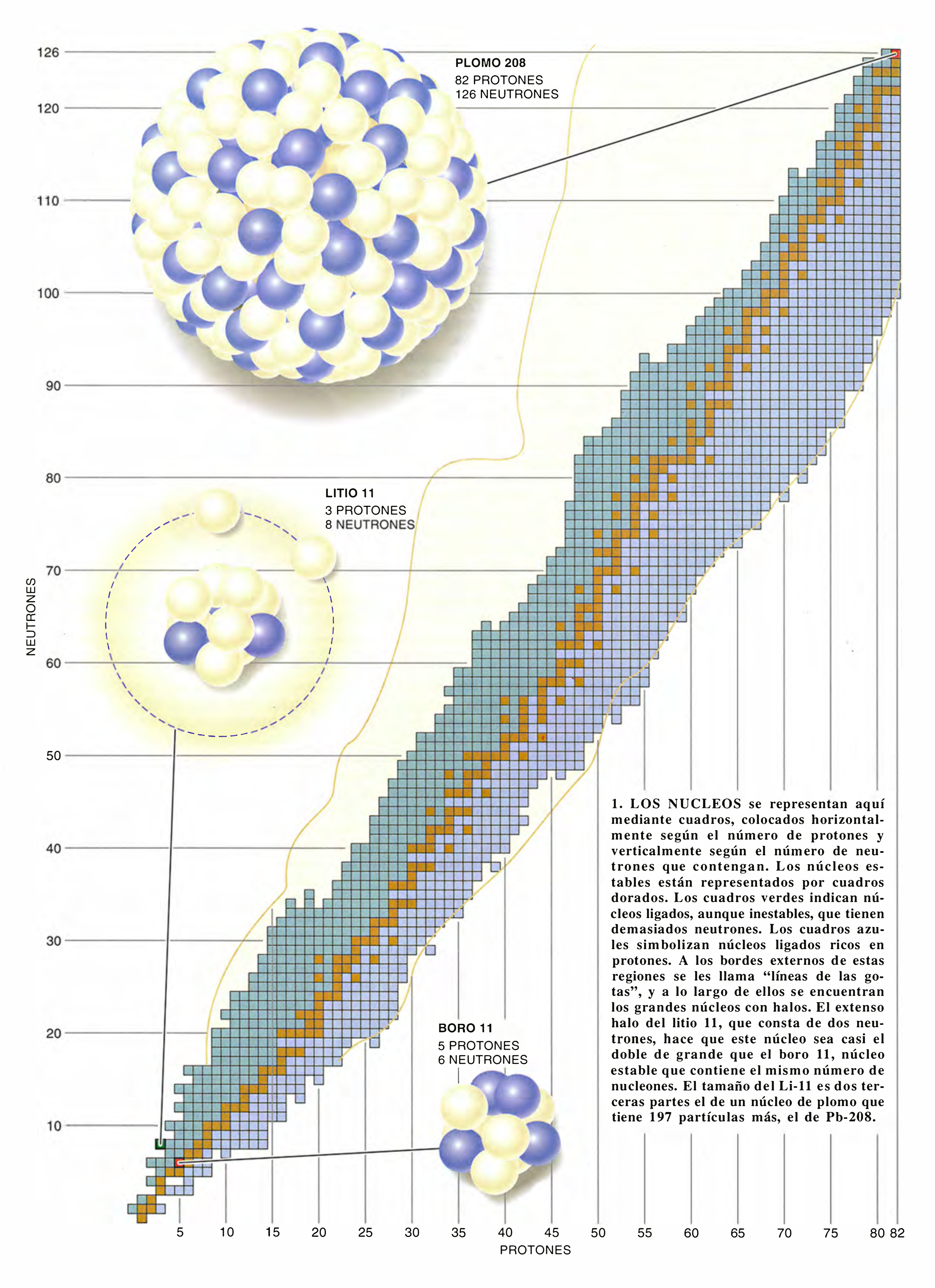
A cierta distancia de esa diagonal —por arriba y por debajo de la misma—, los núcleos se rompen con la misma celeridad con que se forman. No puede haber núcleos verdaderamente enlazados más allá de estos bordes, las "líneas de las gotas", como se les denomina. Los núcleos más exóticos se encuentran en el interior de las líneas de las gotas, en el filo de la estabilidad nuclear. Estos sistemas extremos aparecen sólo en ambientes mucho más hostiles que el nuestro. Se producen en las reacciones que sintetizaron los elementos pesados del universo y ahora alimentan las explosiones estelares de las novas, las supernovas y las erupciones de rayos X. Los astrofísicos piensan que los núcleos colocados a lo largo de la línea inferior de las gotas se hallan en la corteza de las estrellas de neutrones.

SAM M. AUSTIN y GEORGE F. BERTSCH, compañeros largo tiempo en la Universidad estatal de Michigan, se dedican a la física nuclear desde una óptica complementaria, la del experimentador y la del teórico, respectivamente. Austin, docente con el grado máximo en el escalafón académico en la estatal de Michigan, se formó en la Universidad de Wisconsin. Bertsch, que procede de Princeton, pertenece al claustro de la Universidad de Washington.

Primeros indicios de los halos de neutrones

Hasta hace diez años los físicos no contaban con los medios adecuados para estudiar esos núcleos. Entonces, Isao Tanihata y sus colaboradores, del Laboratorio Lawrence de Berkeley, desarrollaron una técnica para observar la interacción entre núcleos inestables y otros núcleos. Este método ha conducido al descubrimiento de halos en múltiples núcleos. Hasta la fecha, el núcleo con halo que ha recibido mayor atención ha sido un isótopo del litio, el Li-11; consta de tres protones y ocho neutrones. Los análisis de su fugaz estructura han descubierto muchas cosas acerca de la sorprendente naturaleza de los halos en general.

El Li-11 se descubrió en el Laboratorio Lawrence de Berkeley en 1966, pero hasta veinte años después no se manifestó su insólita estructura. En 1985, Tanihata intentó medir su tamaño. Mediante un proceso de fragmentación de proyectiles, provocó colisiones, a altas energías, de núcleos ordinarios para producir un haz de isótopos inestables. A continuación colocó una fina lámina de carbono en la trayectoria del haz, y contó qué parte de los núcleos del haz sobrevivía a la travesía de la lámina. El número resultante reflejaba la probabilidad de que interaccionasen con los núcleos de ésta. Los físicos expresan esa probabilidad con una magnitud a la que llaman sección eficaz. Tanihata halló que los núcleos de Li-11 tenían unas secciones eficaces especialmente grandes. La explicación que se dio era que se trataba de núcleos con halo. En el



1. LOS NUCLEOS se representan aquí mediante cuadros, colocados horizontalmente según el número de protones y verticalmente según el número de neutrones que contengan. Los núcleos estables están representados por cuadros dorados. Los cuadros verdes indican núcleos ligados, aunque inestables, que tienen demasiados neutrones. Los cuadros azules simbolizan núcleos ligados ricos en protones. A los bordes externos de estas regiones se les llama "líneas de las gotas", y a lo largo de ellos se encuentran los grandes núcleos con halos. El extenso halo del litio 11, que consta de dos neutrones, hace que este núcleo sea casi el doble de grande que el boro 11, núcleo estable que contiene el mismo número de nucleones. El tamaño del Li-11 es dos terceras partes el de un núcleo de plomo que tiene 197 partículas más, el de Pb-208.

núcleo de Li-11 hay un par de neutrones que están ligados tan débilmente, que yerran hasta mucho más allá de la región central, donde el blanco los arranca con facilidad.

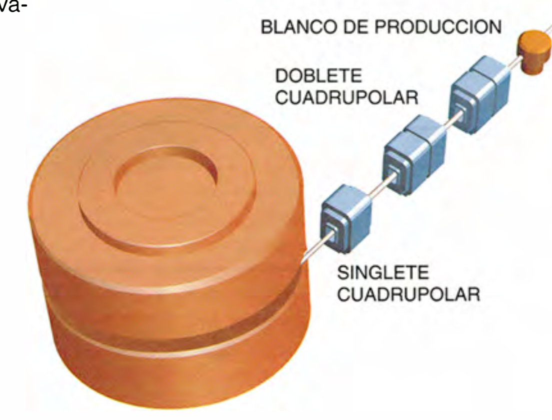
El hallazgo causó estupor. De acuerdo con las leyes de la mecánica clásica, una partícula ligada tiene que permanecer dentro del alcance de las fuerzas de la región central. La mecánica cuántica, sin embargo, admite que, en virtud del efecto túnel, los halos sean posibles. Para representar plásticamente este fenómeno, imaginémonos a un patinador en una pista cóncava [*véase la figura 2*]. Su energía total limita la distancia que recorre: cuanta más energía tenga, más alto subirá. No puede subir más arriba de lo que corresponda a la cantidad de energía que le haya dado a su movimiento. En la mecánica cuántica el encierro no es tan estricto; hasta un patinador indolente saltará de vez en cuando fuera de la concavidad. El tiempo que podrá pasar allí es limitado; el principio de Heisenberg lo relaciona con la energía extra que necesitaría para salir afuera. Cuanto menor sea el coste en energía, más tiempo podrá estar afuera.

Para un objeto de la talla de una persona sobre un patín, la probabilidad de que ocurra el efecto túnel es inimaginablemente pequeña. Ahora bien, a escala atómica y nuclear puede resultar considerable. En el Li-11 es, como observó Tanihata, un efecto espectacular. Los dos últimos neutrones están ligados sólo por unos pocos cientos de miles de electronvolts, más de un orden de magnitud menor que la energía de enlace normal. En consecuencia, tales neutrones requieren muy poca energía para alejarse del núcleo. Pueden quedarse allí bastante tiempo, dispersarse y formar un tenue halo. Comparando su tamaño con otros núcleos, la distancia media del halo del Li-11 al centro del núcleo mide unos cinco femtómetros, o más del doble que la distancia normal para un núcleo de su masa [*véase la figura 1*].

Investigaciones posteriores descubrieron que el núcleo de Li-11 escondía otros aspectos no menos insólitos. El isótopo Li-10, que tendría un neutrón menos, no está ligado, lo que quiere decir que sus tres protones y siete neutrones no se mantendrán unidos en forma de núcleo. Si de Li-11 se quita un neutrón, un segundo neutrón se irá también inmediatamente, y quedará Li-9. Por tanto, el Li-9 y los dos neutrones están enlazados a modo de un sistema de tres cuerpos, que se descompone si se retira una de las partículas. Por esta razón, Mikhail Zukov, de la Universidad sueca de Goteburgo, llamó al Li-11 núcleo "borromeico": recuerda el símbolo heráldico de los príncipes italianos de la familia de los Borromeo, cuyo escudo lo forman tres anillos entrelazados de suerte tal, que, si se quita uno, los otros se separan. Se conoce media docena más de núcleos borromeicos.

Fabricación de núcleos exóticos

A lo largo de los últimos diez años, los físicos experimentales han elaborado dos métodos, basados en un fundamento diferente, para el estudio de los núcleos dotados de halo. Algunos examinan los fragmentos de los núcleos que hacen de blanco; otros, en cambio, analizan los fragmentos de los proyectiles que bombardean un blanco de producción. En la primera estrategia hay que extraer del material del blanco los isótopos de interés. Si un elemento es volátil, sus isótopos se difundirán fuera del blanco cuando éste se caliente; se los podrá entonces ionizar y separar. A esta técnica se la llama ISOL (acrónimo inglés de "separación en funcionamiento de isótopos"). La vida media del Li-11 se midió por vez primera en el ISOLDE, el laboratorio de tipo ISOL del CERN. Actualmente se están construyendo nuevas instalaciones en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, en Tenessee, y en varios otros laboratorios de distintos lugares del mundo.



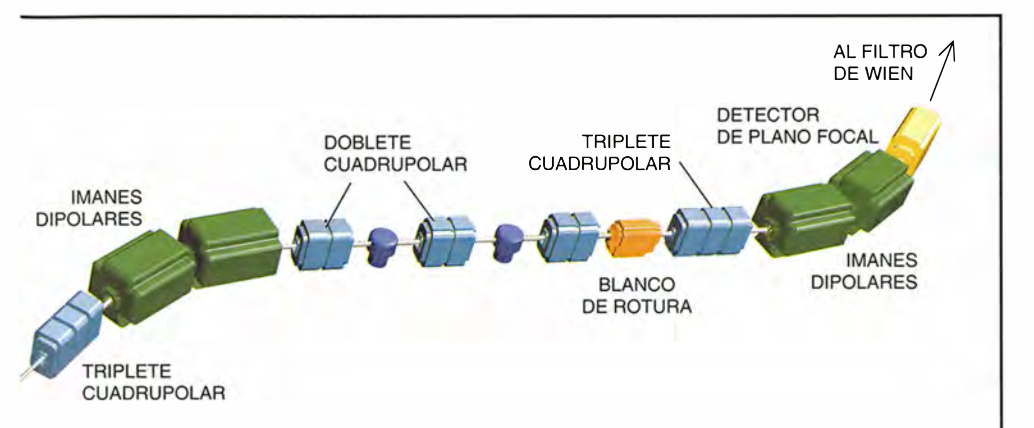
En el marco de la segunda estrategia, el blanco rompe los núcleos que sirven de proyectiles en fragmentos cuya velocidad es la misma que la del proyectil original, y a continuación se estudian los fragmentos de propiedades insólitas. Paradójicamente, la gran velocidad del haz hace que haya muchos núcleos que resultan más fáciles de estudiar, sobre todo los isótopos de vida corta como el Li-11 (cuya semivida es de sólo nueve milisegundos). Diversos laboratorios a los que se conoce por su acrónimo —el GALIL de Caen, Francia, el NSCL, de la Universi-

La caracterización de los halos

Rainer Neugart y sus colaboradores del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas situado cerca de Ginebra, investigaron la interacción entre los tres componentes del Li-11 (los dos neutrones del halo y el núcleo del Li-9); comprobaron, en particular, si el halo ejercía algún efecto en la región central del núcleo. Tras medir las propiedades eléctricas y magnéticas del isótopo, hallaron que coincidían con las del núcleo de Li-9. Como los neutrones del halo no tienen carga —y, como pareja, carecen de espín o momento magnético—, este resultado respaldaba la idea de que la región central del núcleo del Li-9 y el halo formado por los dos neutrones eran objetos harto independientes.

Pertrechados con esta información, los físicos experimentales esperaban conocer en la fase siguiente la disposición de cada nucleón en el núcleo del Li-11. Para descubrirlo, Toshio Kobayashi y sus colaboradores, del Laboratorio Lawrence de Berkeley, examinaron las distribuciones de momento en los núcleos de Li-11. Su movimiento, sujeto a las leyes de la mecánica cuántica, satisface otra relación que es parte del principio de incertidumbre de Heisenberg. En virtud del mismo, las partículas no pueden tener un momento preciso, sino que poseerán una gama de momentos a tenor de su distribución, según lo refleja su función de onda. Cuanto más dispersa y suave sea la función de ondas, más acotado estará el momento de la partícula. Por tanto, si el halo cubre una gran distancia y un blanco lo desprende de su región central, los momentos de los neutrones separados variarán poco con respecto a sus momentos iniciales. Viajarán casi en línea recta hacia delante, y casi a la misma velocidad.

Kobayashi y su equipo siguieron un camino ligeramente indirecto para inferir el momento del halo. Produ-



dad estatal de Michigan, el RIKEN, cerca de Tokyo, y el GSI, cerca de Darmstadt, Alemania— han construido aparatos de este tipo para trabajar con los haces radiactivos y estudiar los núcleos inestables.

En 1990 Bradley M. Sherrill y sus colaboradores construyeron el separador de fragmentos de la estatal de Michigan, el A1200. Filtra los núcleos exóticos sometiendo el haz de fragmentos a varias fuerzas (*izquierda*). Los imanes dipolares doblan el haz según sean los momentos y cargas de los núcleos que lo forman; los dobletes y tripletes de imanes cuadrupolares lo enfocan.

También se puede enviar el haz a través de una lámina delgada, que frena los núcleos en distinta magnitud a tenor de su velocidad y carga. Además, se puede desviar el haz a un filtro de Wien, dispositivo que produce campos eléctricos y magnéticos perpendiculares; sólo los núcleos de una velocidad escogida atraviesan el filtro. Por último, podemos a veces medir el tiempo que a un núcleo le lleva atravesar el separador, lo que aporta otra medición más de su velocidad. Armados con toda esta información, los investigadores han identificado los distintos núcleos que logran pasar a través, y miden además sus velocidades y momentos.

jeron unas reacciones en las que se desprendían del Li-11 los neutrones del halo, y observaron entonces la región central de Li-9 que se movía hacia delante. Como el momento inicial del Li-11 es fijo, la dispersión del momento de la región central tenía que coincidir con la del momento de los neutrones. Por medio de esta relación, hallaron que la distribución del momento era estrechísima, alrededor de un quinto de la medida durante la ruptura de los núcleos normales.

Los experimentos que se realizaron posteriormente en el GANIL de Caen, Francia, dirigidos por Alex C. Mueller, calibraron la desviación de los neutrones mismos, no la que sufría la región central. En esas condiciones, los neutrones del halo salían hacia delante por un cono de unos dos grados de ancho; en cambio, los neutrones de los núcleos ordinarios salían por un cono de diez grados, más o menos. Para infortunio de los físicos, no resultaba fácil ofrecer una interpretación cuantitativa de estos experimentos porque las fuerzas elásticas del blanco también desviaban las partículas.

Un equipo de la Universidad estatal de Michigan, formado por Bradley M. Sherrill, Nigel A. Orr y uno de nosotros (Austin), encontró una manera de salvar ese escollo. Las fuerzas elásticas desvían las partículas a los lados, sobre todo, y apenas cambian la componente del momento paralela a la dirección del haz. Sabíamos que el efecto del halo sería el más claro si podíamos medir la dispersión de la componente paralela del momento, pero el haz de Li-11 que usábamos ya tenía una dispersión del momento diez veces mayor que el efecto que había que medir. Por suerte, el separador de fragmentos de la estatal de Michigan, el A1200, le permite al experimentador desperdigar los haces y concentrar las partículas en distintas zonas según la cuantía en que sus momentos vayan cambiando [*véase el recuadro sobre fabricación de núcleos exóticos*], y no según sus momentos finales. De esta forma, el separador puede identificar los cambios de momento causados por la rotura.

Gracias a este método, llamado de pérdida de energía, los investigadores de la Universidad estatal de Michigan obtuvieron una resolución mucho menor que la anchura de la distribución de momento que deseábamos medir. Un haz de Li-11 daba

en una serie de blancos de masas atómicas diferentes, del berilio al uranio, a los que se colocaba, uno solo cada vez, cerca del centro del aparato. Los núcleos de Li-9 resultantes de estas roturas mostraban una distribución de momentos estrecha; esta anchura era casi independiente de la masa del blanco. Como las interacciones nucleares intervenían en la rotura cuando se trataba de blancos ligeros, y, en cambio, cuando eran pesados, lo hacían las fuerzas eléctricas, o de Coulomb, llegamos a la conclusión de que el resultado era independiente del mecanismo de la reacción y reflejaba directamente la estructura del halo. Inferíase de todo ello que el radio del Li-11 doblaba, de lejos, el radio de su región central.

Modelos y predicciones

Mientras se ejecutaban estos experimentos, los teóricos se esforzaban por comprender el singular comportamiento del Li-11. Se enfrentaban a dos grandes obstáculos, todavía por superar. En primer lugar, no se conocen las fuerzas entre los nucleones con la precisión necesaria para predecir las sutiles propiedades de enlace de los núcleos con halo. En segundo lugar, aun cuando se conocieran tales fuerzas, los computadores actuales no poseen la velocidad ni memoria necesarias para solucionar las ecuaciones de la mecánica cuántica que describen el comportamiento de 11 nucleones en interacción. Pese a ello, se han desarrollado modelos simples que ponen de relieve los principales rasgos físicos de los núcleos con halo.

Un rasgo que los físicos intentan apresar en sus modelos es el papel que desempeña el emparejamiento en los sistemas de muchos nucleones. En general, la interacción de emparejamiento es la atracción entre las partículas menos ligadas de un sistema; puede afectar radicalmente a las propiedades de éste. En los metales, por ejemplo, el emparejamiento de los electrones da lugar a la superconductividad. La interacción de emparejamiento reviste, asimismo, importancia fundamental en casi todos los demás aspectos de la estructura nuclear. Determina qué núcleos son estables, y su presencia promueve la fluidez de procesos que modifican la forma, como la fisión nuclear. En un gas de neutrones diluido, el emparejamiento condiciona las propiedades de las estrellas de neutrones, que dependen de que los neutrones actúen o no como un superfluido. Y, por último, el emparejamiento causa el comportamiento borromeico.

Se ha elaborado una amplia gama de modelos útiles, basados en suposiciones muy diferentes sobre el emparejamiento. P. Gregers Hansen, de la Universidad danesa de Aarhus, y Björn Jonson, de la Universidad Tecnológi-

Medición de los momentos eléctricos y magnéticos

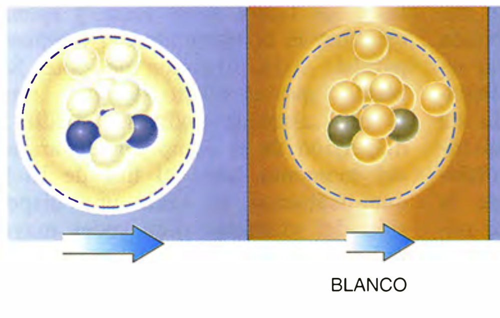
Rainer Neugart y sus colaboradores del CERN compararon las propiedades magnéticas y eléctricas del Li-11 y del Li-9 en un singular aparato. Un campo eléctrico desviaba los iones procedentes del separador ISOLDE hacia un tubo de haces y a través de un gas, donde se neutralizaban. Este haz se bañaba en luz de láser polarizada, que alineaba los espines de los átomos. Luego, los átomos se paraban en un cristal. Un campo magnético que rodeaba esta parte del aparato determinaba que los espines experimentasen precesión y cambiasen su dirección. Tras unos pocos milisegundos, los núcleos sufrían una desintegración beta. Emitían electrones preferentemente a lo largo del eje del espín. A partir de las direcciones de emisión de esos electrones de desintegración, se podían deducir las propiedades eléctricas y magnéticas del núcleo.

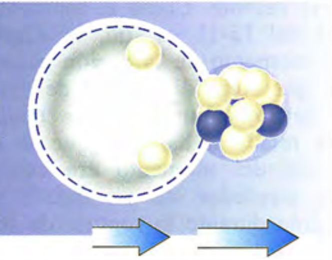
Así se pierde un halo

Aaron I. Galonsky y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Michigan, han investigado dos concepciones contrapuestas de cómo pierde un núcleo su halo. En una de ellas, los neutrones del halo se liberan instantáneamente cuando interaccionan con un blanco (*arriba*). En la otra, el campo eléctrico, o de Coulomb, generado por las cargas del blanco, provoca la vibración del núcleo; la región central cargada se mueve en una dirección y el halo en la otra (*abajo*). Para contrastar estas posibilidades, el grupo de Galonsky excitaba el núcleo de Li-11 con la máxima suavidad que les era permitido, haciendo pasar el haz a través de un blanco de plomo, con lo que es probable que se produzca una excitación coulombiana. Se medían entonces los ángulos de emisión y las energías de los dos neutrones y del Li-9 resultantes de la rotura.

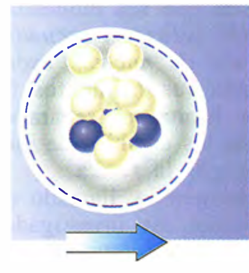
La energía absorbida, muy pequeña, estaba perfectamente definida. Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, pues, la rotura del sistema vibrante debería llevar un tiempo bastante lar-

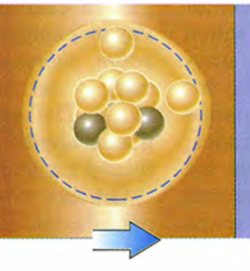
PRIMERA POSIBILIDAD

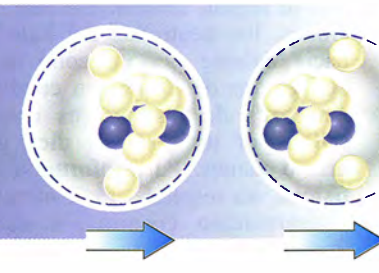


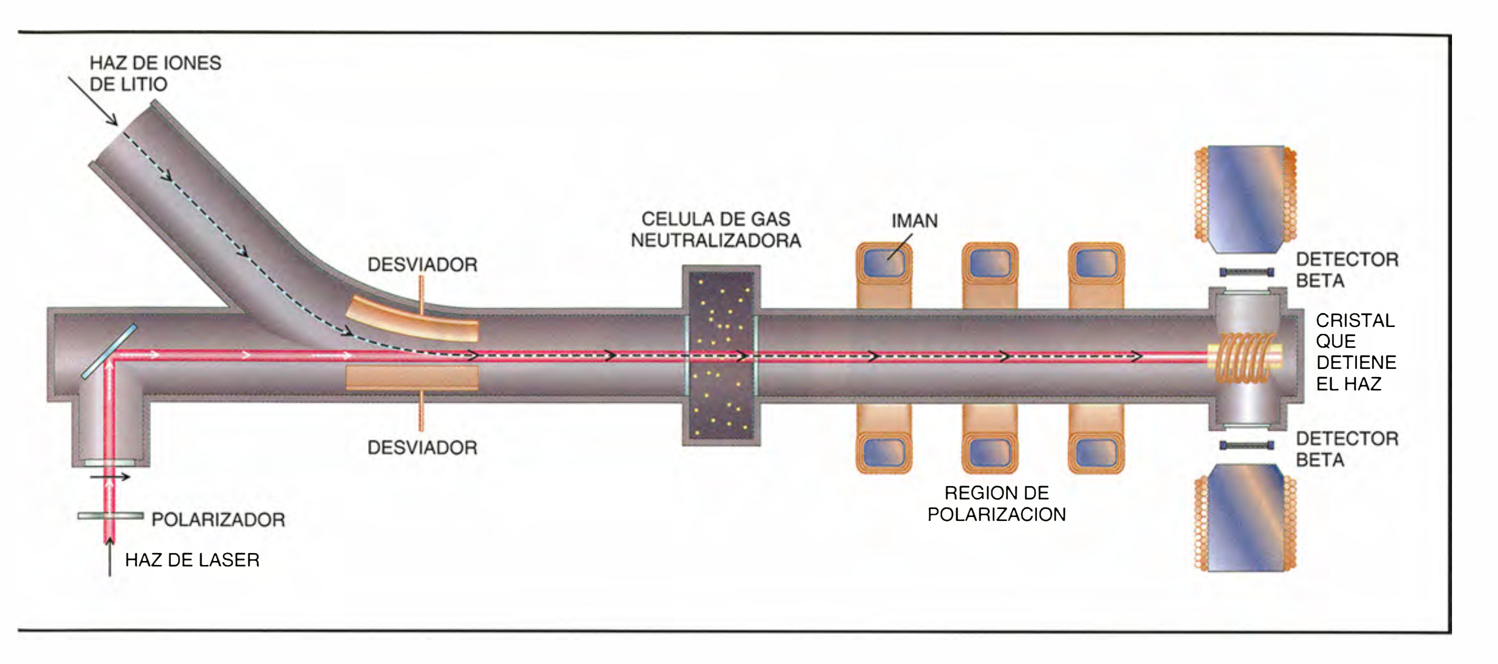



SEGUNDA POSIBILIDAD









ca Chalmers, en Suecia, propusieron un modelo simple en 1988. Supusieron que el emparejamiento entre los dos últimos neutrones del Li-11 era tan intenso, que podían considerarse una sola partícula, un dineutrón.

El movimiento de esta partícula en el campo de la región central del Li-9 es un problema de dos cuerpos, hasta cierto punto fácil de resolver. En realidad, si el enlace es débil —tanto que resulte poco probable que ambas partículas interaccionen entre sí—, la función de ondas se puede buscar en un libro de texto. Con esta aproximación, Hansen y Jonson derivaron unas fórmulas para el tamaño del halo, para la probabilidad de la rotura del núcleo en el campo eléctrico de un blanco muy cargado y para la energía del dineutrón tras la rotura. Pero con este modelo tan simple no pudieron calcular la energía de enlace del halo.

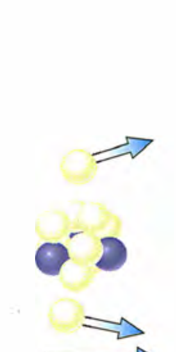
Siendo aún un estudiante de carrera en la Universidad estatal de Michigan, James Foxwell investigó otro modelo extremo, bajo la guía de uno de los autores (Bertsch). En contraste con la idea del dineutrón, el modelo de Foxwell ignora en absoluto el emparejamiento de los neutrones. Supone que cada uno de los dos últimos neutrones está enlazado por separado al núcleo. Entonces, se resuelve un problema de dos cuerpos para cada neutrón. Foxwell calculó las probabilidades de rotura y la energía del sistema excitado. Igual que el modelo de Hansen-Jonson, la aproximación de Foxwell requiere que se sepa de antemano la energía de enlace. Vale la pena destacar que ambas estrategias, tan dispares, produjeron predicciones similares de la fragilidad del Li-11; sus cálculos de la sección eficaz difieren sólo en un factor de dos.



Investigaciones recientes sobre los halos

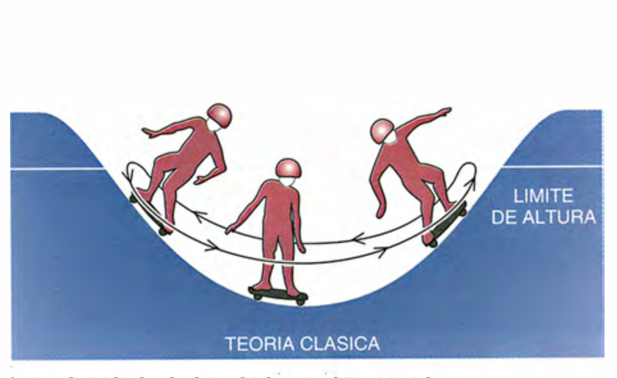
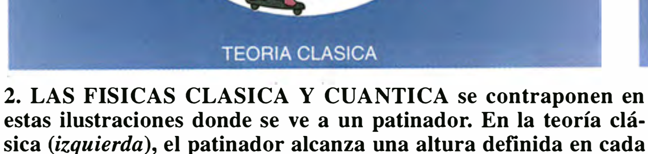
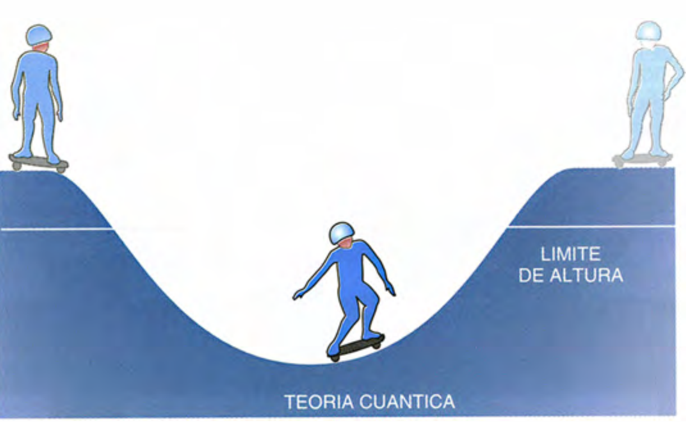
De entonces acá, los teóricos han construido modelos más depurados en los que han incorporado explícitamente las fuerzas que dan lugar al emparejamiento. Puesto que en mecánica cuántica el problema de los tres cuerpos era ya susceptible de resolución numérica por medio de grandes ordenadores, podía abordarse en la práctica el Li-11 como un sistema de tres partículas. Henning Esbensen, del Laboratorio Nacional de Argonne, calculó la función de ondas del Li-11 a partir de un tratamiento más aproximado de la fuerza de emparejamiento y una descripción realista de la interacción entre los neutrones y la región central de Li-9. Su función de ondas mostraba que, cuando los neutrones están muy alejados en el halo, lo probable es que se hallen muy cerca uno del otro.

Por el contrario, cuando los neutrones se encuentran cerca de la región central, tienden a estar bastante apartados. Por tanto, la mecánica cuántica real del emparejamiento describe el comportamiento dentro de los límites de los dos modelos extremos. La sección eficaz calculada cae a medio camino entre las predicciones de esos modelos y concuerda con la experimentación. Como suele ocurrir en física nuclear, pueden ser válidos modelos muy diferentes, y sus dominios de validez llegan incluso a superponerse. El modelo de los tres cuerpos acertó también en su



go. Pero hallaron que el Li-11 se rompía enseguida, como si los neutrones se liberasen al producirse una colisión. Infirieron esto de una observación que no guardaba, en apariencia, relación alguna con las otras: al comparar la velocidad de la región central del Li-9 y las de los dos neutrones, vieron que los neutrones se movían más despacio. Al principio resultó desconcertante que los neutrones fueran más lentos si el proceso de rotura era tan suave.

La explicación se encuentra en el discurrir temporal de la rotura misma. Por estar dotado de carga, el Li-11 se decelera a medida que se acerca al campo de Coulomb del blanco y luego se reacelera cuando se aleja. En la concepción oscilatoria la rotura tarda tanto, que el núcleo de Li-9 habría llegado mucho más allá del alcance de la fuerza de Coulomb del blanco antes de que se produjese. Pero en una rotura instantánea el Li-9 se desprende cerca del blanco, donde está aún sujeto a la reaceleración coulombiana. Por el contrario, a los neutrones, desprovistos de carga, no les afecta el campo eléctrico y, en consecuencia, se mueven más despacio, como se observaba. En conformidad con ello, el grupo de Galonsky concluyó que el núcleo de Li-11 había perdido su halo al pasar por el blanco.

2. LAS FISICAS CLASICA Y CUANTICA se contraponen en estas ilustraciones donde se ve a un patinador. En la teoría clásica (*izquierda*), el patinador alcanza una altura definida en cada lado de la pista, según la energía que tenga. Bajo las leyes cuánticas, representadas a la derecha, llega más lejos, allende el límite que le impone su energía, como indican las figuras desvaídas.

predicción de la dispersión del momento en la rotura del Li-11, que se midió en la instalación de la estatal de Michigan.

Ian Thompson y sus colaboradores, de la Universidad de Surrey, hicieron unos cálculos similares. Este grupo utilizó una fuerza entre los neutrones más realista, pero trató la interacción entre neutrón y región central de forma más aproximada. También les salió que el Li-11 es borromeico y tiene un gran halo. La coherencia de estos resultados hace que confiemos en que nuestro conocimiento del emparejamiento de neutrones en un entorno de baja densidad, como el que quizá se encuentre en las cortezas de las estrellas de neutrones, es bueno.

Ahora que se ha descubierto y estudiado un aspecto nuevo del comportamiento nuclear, es natural que uno se haga esta pregunta: "¿Hacia dónde nos dirigimos?" Está claro que los halos afectan a muchas reacciones nucleares. En ese contexto, los físicos experimentales se proponen medir las reacciones entre el Li-11 y los protones para determinar la probabilidad de que un protón capte dos neutrones y forme tritio. La correlación entre los neutrones influye directamente en esta probabilidad, pues, para combinarse con un protón de bombardeo, los dos neutrones deben estar muy juntos. Mediante el análisis de estas reacciones, podremos obtener una medida directa de dichas correlaciones.

Los experimentos de Karsten Riisager y sus colaboradores del CERN han mostrado que los núcleos con halo exhiben unas propiedades singulares cuando sufren la desintegración beta. Observaron el núcleo borromeico helio 6, que tiene dos protones y cuatro neutrones. Cuando este núcleo sufre la desintegración beta, puede que uno de los neutrones de su halo se convierta en un protón. Por lo normal, este protón permanecería ligado al núcleo, pero en el He-6 puede combinarse con su compañero neutrón y escapar en forma de deuterón.

Mayor alcance entraña la voluntad de los físicos de estudiar los halos de núcleos más pesados. El grueso de las investigaciones se ha centrado hasta la fecha en dos núcleos, el Li-11 y un isótopo del berilio, el Be-11; ambos, fáciles de producir y aislar. Se planean nuevas instalaciones para crear sistemas más pesados. Pero ya se ha empezado a utilizar el equipo actual en busca de núcleos con halo cuyas masas sean de alrededor de 20.

Algunos analizan en estos momentos el núcleo borromeico del berilio 14. En la Universidad estatal de Michigan se han medido las distribuciones del momento de un isótopo del carbono, el C-19, que contiene siete neutrones más que el C-12, la forma más estable. Por su parte, investigadores del GANIL han descubierto el carbono 22, que tiene incluso tres neutrones más.

Los teóricos también han empezado a investigar las propiedades de los núcleos de la línea de las gotas que portan más de dos nucleones de halo. En esos sistemas, los aspectos del emparejamiento que son característicos de los sistemas de muchas partículas adquieren especial interés. En los núcleos borromeicos estos halos quizá sean mucho mayores que los vistos en el Li-11. Vitaly Efimov, físico de la Universidad de Washington, ha predicho ese fenómeno. Mostró que, cuando la interacción entre las partículas de un sistema de tres cuerpos es tan fuerte que casi las ligue dos a dos, puede que el sistema tenga muchos estados de halo extenso; en potencia, infinitos.

Por último, es posible que los protones débilmente ligados den lugar a halos nucleares. El mejor ejemplo quizá sea un isótopo del boro, el B-8, que contiene un protón ligado de forma muy laxa. Su ligadura es peor que la de los neutrones del Li-11, y parece plausible que su halo sea esférico. Para determinar las características del halo del B-8, los equipos de varios laboratorios han empezado a medir la distribución de la componente paralela del momento del núcleo.

Los astrofísicos tienen un interés especial en el núcleo de B-8 porque en el Sol produce neutrinos que se detectan con facilidad. Pero el número de neutrinos procedentes de la desintegración del B-8 en el Sol que se detecta es mucho menor que el predicho. Se trata de una anomalía importante. Cabe esperar que el conocimiento de la naturaleza exacta de este núcleo proporcione alguna pista para la resolución del misterio. El estudio de los núcleos cercanos a las líneas de las gotas seguramente dará más sorpresas, pero los halos ya nos han enseñado mucho acerca de lo que ocurre en los límites exteriores de la estabilidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CAULDRONS IN THE COSMOS: NUCLEAR ASTROPHYSICS. Claus E. Rolfs y William S. Rodney. Universidad de Chicago Press, 1988.

PHYSICS WITH RADIOACTIVE BEAMS. Richard N. Boyd e Isao Tanihata en *Physics Today*, volumen 45, n.º 6, págs. 44-52; 1 de junio, 1992.

NUCLEI AT THE LIMITS OF PARTICLE STABILITY. A. C. Mueller y B. M. Sherrill, en *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 43, págs. 529-584; 1993.

NUCLEAR HALO STATES. K. Riisager, en *Reviews of Modern Physics*, volumen 66, n.º 3, págs. 1105-1116; 1 de julio, 1994.

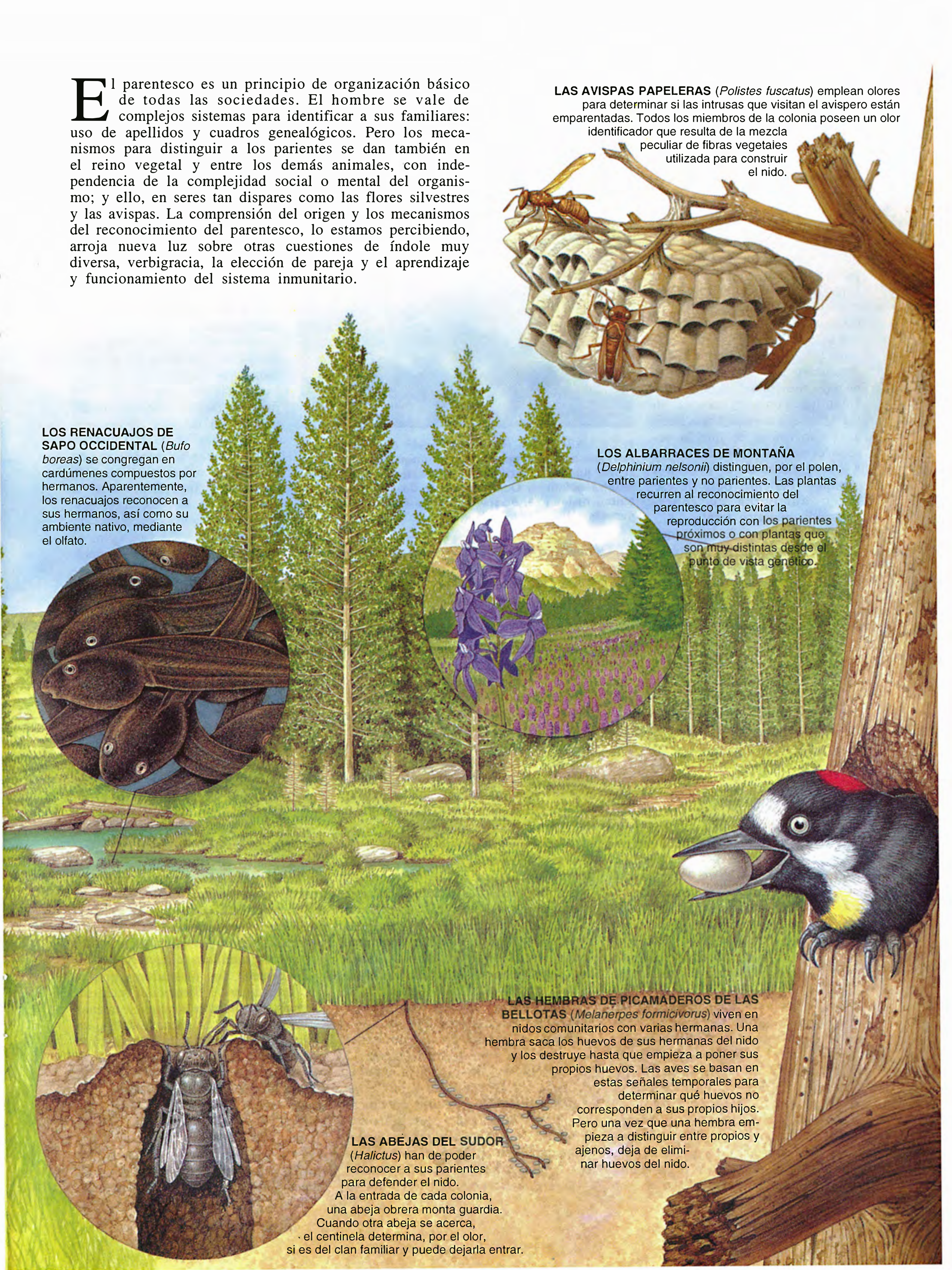
Reconocimiento del parentesco

Muchos organismos, de los tunicados a los primates, pueden identificar a sus parientes. Tras desentrañar cómo y por qué lo hacen, empezamos a entender mejor la evolución del comportamiento social

David W. Pfennig y Paul W. Sherman



El parentesco es un principio de organización básico de todas las sociedades. El hombre se vale de complejos sistemas para identificar a sus familiares: uso de apellidos y cuadros genealógicos. Pero los mecanismos para distinguir a los parientes se dan también en el reino vegetal y entre los demás animales, con independencia de la complejidad social o mental del organismo; y ello, en seres tan dispares como las flores silvestres y las avispas. La comprensión del origen y los mecanismos del reconocimiento del parentesco, lo estamos percibiendo, arroja nueva luz sobre otras cuestiones de índole muy diversa, verbigracia, la elección de pareja y el aprendizaje y funcionamiento del sistema inmunitario.



LAS AVISPAS PAPELERAS (*Polistes fuscatus*) emplean olores para determinar si las intrusas que visitan el avispero están emparentadas. Todos los miembros de la colonia poseen un olor identificador que resulta de la mezcla peculiar de fibras vegetales utilizada para construir el nido.

LOS RENACUAJOS DE SAPO OCCIDENTAL (*Bufo boreas*) se congregan en cardúmenes compuestos por hermanos. Aparentemente, los renacuajos reconocen a sus hermanos, así como su ambiente nativo, mediante el olfato.

LOS ALBARRACES DE MONTAÑA (*Delphinium nelsonii*) distinguen, por el polen, entre parientes y no parientes. Las plantas recurren al reconocimiento del parentesco para evitar la reproducción con los parientes próximos o con plantas que son muy distintas desde el punto de vista genético.

LAS HEMBRAS DE PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS (*Melanerpes formicivorus*) viven en nidos comunitarios con varias hermanas. Una hembra saca los huevos de sus hermanas del nido y los destruye hasta que empieza a poner sus propios huevos. Las aves se basan en estas señales temporales para determinar qué huevos no corresponden a sus propios hijos. Pero una vez que una hembra empieza a distinguir entre propios y ajenos, deja de eliminar huevos del nido.

LAS ABEJAS DEL SUDOR (*Halictus*) han de poder reconocer a sus parientes para defender el nido. A la entrada de cada colonia, una abeja obrera monta guardia. Cuando otra abeja se acerca, el centinela determina, por el olor, si es del clan familiar y puede dejarla entrar.

El interés actual por el reconocimiento del parentesco hunde sus raíces en dos teorías. En 1964, William D. Hamilton observó que, en la pugna por la supervivencia y la reproducción genética, la evolución no hacía distingos entre formas alélicas de genes que se transmiten a través de descendientes directos y formas que se propagan a través de parientes no descendientes; los hijos ejemplifican el primer caso y los hermanos, el segundo. Sostenía la teoría tradicional que la selección natural favorecía a los individuos que producían un mayor número de descendientes, en tanto que Hamilton ponía el acento en los genes. Y en esa línea llegó a la conclusión de que la selección natural debía favorecer a los organismos que ayudan a cualquier pariente, pues de ese modo aumentan su representación genética total.



1. LAS ASCIDIAS (en la ilustración *Botryllus schlosseri*) son animales marinos que, aunque carecen de cerebro, pueden identificar a sus parientes a través de señales químicas. Ocasionalmente dos organismos intentan fusionarse, lo que sólo tiene éxito si están emparentados.

Porque comprende los genes que un organismo transmite a través de su descendencia y los genes que aquél ayuda a propagar entre los parientes reproductores, Hamilton denominó, a su propuesta, teoría de la eficacia inclusiva. Esta teoría explica la aparición del fenómeno del nepotismo, el que se da sobre todo cuando algunos miembros de ciertas especies (hormigas, abejas o ratas topo desnudas, por ejemplo) no tienen descendencia y su misión en la vida consiste en procurar alimento para otros parientes.

A comienzos de los setenta, Patrick Bateson y William M. Shields elaboraron una segunda teoría: la de la exogamia óptima; se funda en un dato de observación común, a saber, que la endogamia entre hermanos o parientes muy próximos suele engendrar hijos con deficiencias. Todos los organismos poseen alelos deletéreos, que no se expresan; son pocos y existe una elevada probabilidad de que también los porten los parientes cercanos. Si se da una estrecha endogamia, los hijos pueden heredar de ambos progenitores tales alelos, con su consiguiente expresión genética nociva. En el extremo opuesto, el apareamiento entre individuos de constitución genética muy diferente puede producir efectos negativos, al desbaratar combinaciones génicas que cifran rasgos ventajosos (favorables). La teoría de la exogamia óptima explica por qué muchos organismos prefieren aparearse con quienes, en punto a parentesco, no son ni cercanos ni remotísimos.

De la investigación ulterior han emergido nuevas ideas que aclaran los motivos del reconocimiento del parentesco. Las razones evolutivas de semejante capacidad constituyen sólo una parte del relato, y a ella volveremos más adelante. Conviene empezar por una cuestión no menos intrigante: cómo sabe un organismo que otro es pariente suyo. En general, plantas y animales se sirven de dos mecanismos para distinguir a los familiares. En algunos casos, se guían por los rasgos físicos, por el fenotipo, para reconocer directamente a los suyos. De forma alternativa e indirecta, pueden identificar a los allegados por señales relacionadas con el tiempo o el lugar.

Los organismos suelen aplicar una combinación de técnicas directas e indirectas. Por ejemplo, los aviones zapadores *(Riparia riparia)*, aves que anidan en colonias en orillas arenosas, identifican a sus crías haciendo uso de ambos tipos de señales. John L. Hoogland y uno de los autores (Sherman) descubrieron que los progenitores alimentan a cualquier pollo que aparezca por la madriguera, lo que revela que los aviones adultos reconocen indirectamente a sus crías al haber retenido el punto de ubicación de la madriguera por ellos excavada. Los pollos, incapaces de volar, permanecen en la madriguera hasta tres semanas después de la eclosión; durante ese tiempo, los padres por lo general sólo ceban a sus propias crías. Ahora bien, en cuanto éstas aprenden a volar, las polladas se mezclan unas con otras; ello significa que los padres deben recurrir a indicios directos que les aseguren que continúan aprovisionando sólo a sus propios hijos. Michael D. Beecher y sus colaboradores hallaron que, a los 20 días de nacer, los pollos de esta especie poseen signaturas vocales distintivas, que facilitan a los padres el reconocimiento de sus hijos.

Al objeto de desentrañar la forma en que tales discriminaciones se llevan a cabo, los investigadores han dividido el proceso de reconocimiento del parentesco en tres componentes: producción de la señal de reconocimiento, recepción de la misma por otro individuo y, finalmente, interpretación de la señal por el receptor, que emprende la acción adecuada. En el reconocimiento indirecto, la señal es externa a la planta o animal; en el reconocimiento directo, la produce el propio organismo. Las comunidades de animales sociales, donde se entremezclan parientes con no parientes, utilizan con mayor frecuencia el método directo. ¿Cómo desentrañar la compleja interacción de factores que convergen en el proceso de reconocimiento directo del parentesco?

Cualquier atributo físico que guarde, sin error, correlación con el grado de parentesco puede constituir una señal de reconocimiento directo del parentesco. Esos puntos de atención varían mucho de unas especies a otras. Las referencias visuales son comunes entre los primates y aquellos animales cuyo sentido privilegiado es la vista. Los organismos que han de atraer a su pareja distante y en la oscuridad, como las ranas, emplean señales auditivas. Y, por supuesto, muchos animales se orientan por olores químicos característicos.

En general, los marcadores químicos transmiten información precisa. Además, su producción requiere menos esfuerzo que la de otras señales, en particular los sonidos. El organismo invierte una notable cantidad de energía comprimiendo aire para crear el sonido. En cambio, las señales químicas suelen constar de unas cuantas moléculas de una sustancia que el cuerpo fabrica de forma natural durante su actividad diaria. El organismo cuenta de partida con un sistema para detectar e identificar las sustancias

químicas: el sistema inmunitario. En opinión de algunos, la maquinaria fisiológica utilizada en el reconocimiento del parentesco se tomó prestada del sistema inmunitario en el decurso de la evolución.

Las señales de reconocimiento difieren no sólo en función del sentido en que se basan, sino también en razón de su origen. Tales claves pueden reflejar rasgos genéticos específicos, pueden adquirirse del ambiente o pueden resultar de la interacción de ambas cosas. Los estudios realizados en ciertos tunicados, o ascidias, de modo particular en *Botryllus schlosseri*, demuestran que estos animales marinos utilizan marcadores genéticos, para identificar a sus parientes. Reconocimiento del parentesco que no depende de la complejidad cerebral: los tunicados carecen de cerebro.

Las ascidias son, en el comienzo de su vida, larvas planctónicas. Con el tiempo, acabarán asentándose sobre una roca y multiplicándose asexualmente para formar una colonia entrelazada de individuos que, desde el punto de vista estructural y genético, son idénticos. Acontece a veces que dos colonias se aprestan a fusionarse; puesto que los organismos grandes sobreviven mejor que los pequeños, diríase que semejante agregación resulta beneficiosa. Richard K. Grosberg y James F. Quinn descubrieron que las larvas se instalan cerca de organismos genéticamente similares y se funden con ellos. Pero si un tunicado intenta sumarse a otra colonia con la que no tiene lazos de parentesco, ésta emite sustancias tóxicas que repelen al advenedizo.

Debemos a Grosberg y Quinn la determinación de la zona de los cromosomas que controla dicha respuesta de reconocimiento. Según observaron, las larvas se instalan cerca de otras que portan el mismo alelo en el complejo de histocompatibilidad. Esta región del cromosoma cifra las sustancias químicas que, como parte del sistema inmunitario, le permiten al organismo distinguir lo propio de lo ajeno. Comprobaron, además, que los tunicados preferían instalarse cerca de otros tunicados sin relación de parentesco con ellos aunque sí dotados de la misma versión del gen en esa posición (individuos éstos obtenidos en el laboratorio), en vez de optar por juntarse con familiares genuinos aunque portadores de un alelo alternativo (ejemplares obtenidos también en el laboratorio).

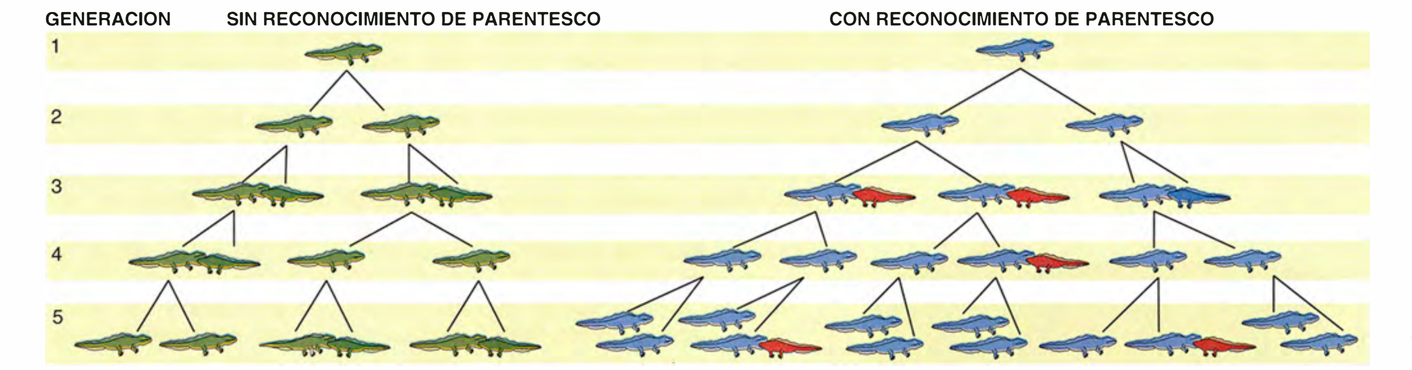
En la naturaleza, las probabilidades de confundir por parientes a quienes no lo son resultan minúsculas. Sin que sepamos del todo la razón, los tipos de genes que hay en el complejo de histocompatibilidad muestran tal variabilidad intraespecífica, que si dos organismos comparten allí un alelo forzosamente deben haberlo adquirido a partir de un antepasado reciente. Por consiguiente, cuando un tunicado intenta fusionar sus tejidos con otro, el sistema inmunitario reconoce si el tejido invasor es propio o ajeno (si está o no emparentado) en función de la constitución genética del complejo de histocompatibilidad.

En el complejo de histocompatibilidad se basan también los ratones domésticos (*Mus musculus*) para identificar a los parientes. Puesto que los genes allí situados afectan al olor corporal, los ratones pueden apoyarse en este rasgo para distinguir a los allegados. Al igual que ocurre en los tunicados, los genes de los ratones que se encuentran en el complejo de histocompatibilidad poseen un alto grado de variabilidad, pero en los miembros de una misma familia los genes tienden a ser los mismos. Por tanto, los individuos que huelen de forma parecida suelen estar emparentados. C. Jo Manning, Wayne K. Potts y Edward K. Wakeland observaron que las hembras tienden a aparearse con machos que despiden un olor distinto del propio, diríase que para evitar la endogamia. Pero anidan en comunidad con hembras que huelen de forma parecida, sus hermanas por ejemplo, lo que ayuda a asegurar tanto la supervivencia de sobrinas y sobrinos como la de los descendientes directos.

A diferencia de los tunicados y los ratones, otros organismos utilizan marcadores adquiridos de su ambiente para reconocer a los parientes. Uno de nosotros (Pfennig) ha estudiado tales señales en *Polistes fuscatus*, una avispa papelera. Estos insectos, comunes en los jardines, construyen nidos en panales abiertos, hechos de finas fibras vegetales, a la manera de obleas. Las colonias constan de una reina y sus hijas obreras.

Aquí el reconocimiento del parentesco resulta imperativo, ya que los nidos reciben la visita frecuente de otras avispas con intenciones diversas. En algunos casos, los visitantes son parientes sin hogar cuyos nidos fueron destruidos por aves depredadoras. En otros, las avispas intrusas vienen a robar huevos para alimentar las larvas de sus propias colonias. Antes de franquear el paso de los nidos a los invasores, las avispas deben distinguir entre parientes que se han quedado huérfanos, que se convertirán en ayudantes, y avispas no emparentadas, que amenazan el nido.

Las avispas papeleras ejecutan esa discriminación directamente, a través de los olores. Pfennig, George J. Gamboa, Hudson K. Reeve y Janet Shell-



2. EL RECONOCIMIENTO DEL PARENTESCO puede condicionar la prosperidad de un grupo de organismos. En este ejemplo, cada salamandra produce dos hijos (sólo se ilustra un progenitor), pero no todos sobreviven, porque se tornan caníbales cuando escasea el alimento. En la tercera generación, sólo la mitad de las salamandras que no pueden reconocer el parentesco (*verdes*) sobreviven para reproducirse; las otras son comidas por sus hermanos. Pero tres de cada cuatro salamandras sobreviven en la familia que puede identificar a los parientes (*azules*), porque la mitad de ellas comen salamandras de otra familia (*rojas*). A la quinta generación, predomina la familia que genéticamente es capaz de distinguir el parentesco.

man-Reeve descubrieron que cada avispa asimila de su nido un olor específico de los insectos que allí viven. Este olor, que sirve como señal de reconocimiento, queda impregnado en la epicutícula, o piel, antes de su endurecimiento. El grupo de Karl E. Espelie determinó que el origen del olor son hidrocarburos odoríferos. Estos compuestos derivan de las fibras vegetales que constituyen el nido de papel, así como de secreciones producidas por las avispas que construyeron el nido. Puesto que cada colonia emplea una mezcla peculiar de plantas en la fabricación del nido, es más frecuente que los miembros de una familia compartan esta etiqueta ambiental adquirida que una etiqueta genética. La mezcla y la recombinación de genes que tienen lugar durante la reproducción sexual aseguran que los miembros de la familia, aunque genéticamente similares, no sean idénticos.

Con todo, lo mismo las marcas genéticas que las adquiridas del ambiente pueden inducir a error. Fiarse sólo de las señales tomadas del ambiente puede producir errores de aceptación, en los que un individuo se equivoca en su ayuda a individuos no emparentados que viven en entornos similares. Los así confundidos pueden luego alzarse con la recompensa de un comportamiento erróneo sin corresponder y, por ende, convertirse en predominantes en la población.

Pero si se depende exclusivamente de productos genéticos podría darse también que un individuo aceptara a falsos parientes que poseen "alelos forajidos" que cifran el rasgo identificador en cuestión. De nuevo, los alelos renegados se extenderán por la población. Además, basarse en señales genéticas aumenta el riesgo de cometer errores de rechazo, en los que los parientes reciben un tratamiento equivocado, como si no fueran tales, al no poseer, por azar, el rasgo de reconocimiento.

La probabilidad de que se produzcan estos tipos de error depende de la constitución genética de los organismos implicados, así como de su entorno. Tunicados y ratones minimizan la probabilidad de que dos individuos no emparentados compartan rasgos genéticos similares al apoyarse en regiones de los cromosomas que varían dentro de una misma especie, si bien se muestran harto constantes en el clan familiar. Tales etiquetas genéticas son muy útiles cuando hablamos de organismos que habitan en un ambiente químico bastante uniforme; por ejemplo, una roca sobre la que vivan varias colonias de tunicados. Para las avispas papeleras, que medran en hábitats más dispares, las marcas adquiridas del entorno proporcionan claves más precisas.

Ya tenemos producida la señal de reconocimiento. ¿Cómo la utilizan otros para establecer el grado de parentesco? Por lo que sabemos, estas señales se aprenden.

Los organismos aprenden las marcas de sí mismos, de sus parientes o de su ambiente. Los individuos crean un patrón de estas marcas, de modo muy parecido a las pautas que, en las aves, se supone involucradas en el aprendizaje del canto. Tal proceso de aprendizaje ocurre, en la mayoría de los animales, durante las etapas iniciales de la vida, cuando presumiblemente conviven con sus parientes. El recuerdo de los compañeros es perdurable, lo que asegura que, a lo largo de toda su vida, un individuo pueda comparar la imagen retenida con los rasgos físicos de otro. Además, muchos animales ponen al día sus patrones, para así reconocer a los parientes cuando sus marcas cambian, por ejemplo, con la edad.

Para ilustrar el papel del aprendizaje en el reconocimiento del parentesco, considérese la función que el nido desempeña en las avispas papeleras. En experimentos de laboratorio, las avispas separadas de su nido y de sus compañeras de avispero reconocían más tarde, como allegados, lo mismo a los individuos emparentados que a los que no lo estaban. Las avispas aisladas de su nido, pero no de sus compañeras, también reputaban parientes a todos los individuos. Más: las expuestas a otro nido aprendían a tratar a las avispas que de él salían como parientes. Sólo en su propio nido los insectos aprendían la señal química que les permite distinguir entre parientes y extraños.

A diferencia de las avispas papeleras, las abejas melíferas *(Apis mellifica)* aprenden las claves de identificación a partir de sus compañeras de colmena y de sí mismas. Una razón de esta diferencia entre las abejas melíferas y las avispas papeleras quizás estribe en las pautas de apareamiento de las reinas. En las colmenas de abejas melíferas suele haber obreras descendientes de más de una docena de zánganos; las obreras de avispas papeleras proceden en su mayoría de un mismo macho. Por consiguiente, las abejas melíferas de una colmena son una mezcla de hermanas y de medias hermanas, mientras que las avispas que comparten un avispero serán en su mayoría hermanas de padre y madre.

Para distinguir entre hermanas "completas" y medias hermanas, una obrera de abeja melífera ha de reconocer los genes heredados del progenitor; y lo mismo a propósito de la abeja que está examinando. Se requiere, pues, algún mecanismo de autoinspección, fenómeno que Richard Dawkins ha llamado "efecto sobaco". Wayne M. Getz y Katherine B. Smith demostraron que las abejas criadas en aislamiento aprendían su propio olor y luego favorecían a las hermanas completas, de olor similar, frente a las medias hermanas, cuya constitución genética ligeramente distinta producía un olor diferente. No está claro si las abejas melíferas aprenden de ellas mismas en las condiciones de hacinamiento de la colmena.

Operado el reconocimiento, el individuo debe decidir qué acción emprender, en función del contexto del encuentro. Las obreras de avispas papeleras son más intolerantes frente a las avispas no emparentadas cuando éstas invaden el nido (para robar huevos) que cuando se encuentran con ellas en otro lugar. Según un modelo teórico desarrollado por Reeve, para que tenga lugar la discriminación, la semejanza entre los rasgos físicos de los individuos observados y el molde que se ha hecho el observador debe superar determinado valor crítico. Dicho valor refleja la razón entre la frecuencia con que se encuentran con parientes y las veces que se topan con no parientes, así como la razón entre los costes de

3. LOS MACHOS DE TRUPIAL ALIRROJO (*Agelaius phoeniceus*) ceban a todos los pollos del nido. La mayoría son hijos suyos, de modo que los adultos se benefician, en el sentido reproductor, al cuidar de todos los pájaros del nido en lugar de arriesgarse a dejar que los emparentados mueran de hambre.

Asuntos de familia

Después de cuatro años estériles en el zoológico de Philadelphia, Jessica, una hembra de los gorilas de llanura (*derecha*), fue trasladada al parque de San Diego. Jessica quedó preñada inmediatamente y parió a Michael la Nochebuena de 1991.

La discriminación por parentesco puede explicar por qué Jessica no se apareó hasta que se la puso en contacto con machos distintos de aquellos con los que había vivido. En la naturaleza, estos individuos serían parientes, y puede que Jessica considerara como tales a sus compañeros. Para evitar la endogamia potencial, los animales no suelen mostrar mucho interés sexual hacia sus parientes cercanos.

En especies que se han reducido hasta una única población pequeña, confundir a los animales familiares no emparentados con parientes puede constituir un grave problema. Si los cuidadores de parques zoológicos son conscientes del reconocimiento del parentesco, pueden evitar que los animales cometan estas equivocaciones y facilitar la reproducción de especies en peligro.



rechazar a los parientes y los costes de aceptar a los no parientes.

Con este modelo podemos entender algunos errores de discriminación. Anne B. Clark y David F. Westneat, Jr., han encontrado que los machos de trupial alirrojo *(Agelaius phoeniceus)* alimentan a todos los pollos de su nido, aunque (debido a que las hembras se aparean con más de un macho) uno de cada cuatro, más o menos, no sea hijo suyo. A buen seguro, le resulta más rentable, desde una óptica reproductora, cebar a todos los pollos del nido, aunque desperdicie un pequeño esfuerzo en crías no emparentadas, que arriesgarse a que uno de sus hijos muera de hambre.

Volvamos ahora a la cuestión sobre el motivo de la capacidad de muchos organismos para reconocer a sus parientes. El significado evolutivo del reconocimiento del parentesco encuentra una representación espectacular en las especies en que algunos miembros pueden atentar contra sus parientes. Ciertos protozoos, rotíferos, nemátodos y larvas de anfibios existen en dos formas distintas, que difieren por su preferencia alimentaria: pueden ser caníbales u omnívoras. El camino que tome cualquier individuo depende, sobre todo, del ambiente en que se crió; en una misma familia pueden darse ambos tipos.

DAVID W. PFENNIG y PAUL W. SHERMAN comparten, desde hace más de diez años, un mismo interés por el reconocimiento del parentesco. Pfennig, docente de la Universidad de Illinois, investiga en la evolución del reconocimiento del parentesco y el polimorfismo del desarrollo. Sherman da clases de etología en Cornell y estudia el comportamiento social de las ardillas de tierra y otras especies.

Con los animales caníbales volvemos a la teoría de la eficacia inclusiva. De acuerdo con la misma, habrían éstos evolucionado en el sentido de evitar comerse a sus propios parientes, por los costes genéticos derivados de dicha práctica: cualquier familia que exhibiera semejante comportamiento no duraría mucho.

Para someter a prueba esa inferencia teórica, estudiamos las pautas de reconocimiento de parentesco en renacuajos de sapo de espuelas *(Scaphiopus bombifrons)*, que se desarrollan en charcas efímeras del desierto. Estos renacuajos poseen un sistema especial de adquirir alimento suplementario que les permite acelerar el desarrrollo y así escapar de sus charcas, que se secan con rapidez.

Todos los renacuajos de sapo de espuelas empiezan siendo omnívoros, detritívoros particularmente. Ocurre a veces que uno se coma a otro o a un camarón de agua dulce; basta ese episodio para desencadenar una serie de cambios en el tamaño, la forma y la musculatura del renacuajo y, lo que es más importante, en su preferencia alimentaria. En adelante, se convierte en carnívoro exclusivo de otros animales, incluidos los de su propia especie.

El que un renacuajo acabe comiéndose a miembros de su propia familia dependerá del equilibrio entre los costos y los beneficios que ello implique. Este equilibrio cambia en función del desarrollo del renacuajo y de la intensidad del hambre. Si el renacuajo permanece omnívoro, tiende a congregarse en cardúmenes formados principalmente por hermanos. Por contra, sus hermanos y hermanas caníbales se asocian de preferencia con no hermanos, a los que se comen.

Los carnívoros mordisquean primero. Tras esta "prueba de sabor", se comen a los renacuajos no emparentados y sueltan, sin hacerles daño, a los hermanos. Y se da un fenómeno esperado: los carnívoros evitan, cuando están ahítos, comerse a sus hermanos y hermanas, aunque no si el hambre aprieta. Los renacuajos dejan de perdonar los allegados cuando su propia supervivencia está en juego; después de todo, un renacuajo carnívoro siempre está más emparentado consigo mismo que con su hermano.

Se repite esa duplicidad de tipos en las salamandras tigre de Arizona *(Ambystoma tigrinum)*. Hay un omnívoro de cabeza pequeña, que come sobre todo invertebrados, y un carnívoro de cabeza grande, que se alimenta de otras salamandras. Todas las larvas empiezan siendo omnívoras, hábito en que persisten si crecen entre hermanos. Pero con frecuencia las larvas se transforman en caníbales si medran entre individuos no emparentados. En el primer caso, al no transformarse en caníbales, reducen las probabilidades de dañar a sus parientes. Junto con James P. Collins, encontramos que los caníbales prefieren salvar los parientes próximos cuando disponen de larvas más pequeñas lejanamente emparentadas. Mediante el expediente de bloquear temporalmente los orificios nasales de los animales, comprobamos que la discriminación se basa en señales químicas.

Además de la argumentación ofrecida por la teoría de la eficacia inclusiva, puede haber otras razones por las que los organismos reconocen a sus parientes. A este respecto, Pfennig y Michael Loeb, junto con Collins, descubrieron que las larvas de las salamandras tigre se hallan expuestas a una bacteria letal. Observamos, además, que las caníbales corren elevado riesgo de sufrir la infección cuando comen a miembros enfermos de su especie. Quizá la selección natural favorece a las caníbales que evitan comerse a sus parientes y con ello evitan los patógenos

que se transmiten más fácilmente entre parientes próximos con sistema inmunitario similar. Tal suposición da por admitido que el reconocimiento del parentesco pudo haber evolucionado no sólo para asegurar la supervivencia de los parientes, sino también para conservar la propia vida.

Estos resultados, que ponen en entredicho las interpretaciones tradicionales del reconocimiento del parentesco, revelan también cuánto deben los biólogos aprender todavía sobre el proceso. En el curso de esta tarea, esperamos obtener más atisbos sobre la evolución de interacciones sociales tan dispares como el nepotismo y el canibalismo. Debido a la conexión fundamental entre el sistema inmunitario y el mecanismo del reconocimiento del parentesco, es de esperar que la investigación futura nos descubra interesantes pormenores del funcionamiento de estos sistemas.

Pero el estudio sobre el reconocimiento del parentesco podría desembocar, asimismo, en una aplicación práctica. Mary V. Price y Nickolas M. Waser han descubierto que los albarraces de montaña (*Delphinium nelsonii*) reconocen el polen de plantas emparentadas. Por su parte, Stephen J. Tonsor y Mary F. Wilson encontraron que la hierba carmín (*Phytolacca americana*) y el llantén menor (*Plantago lanceolata*) crecen más deprisa cuando en la misma maceta tienen hermanos completos o medio hermanos que cuando la comparten con plantas no emparentadas. Si estos efectos de reconocimiento del parentesco están generalizados, podrían usarse con ventaja a la hora de plantar cosechas.

Se ha venido investigando el reconocimiento del parentesco durante más de medio siglo. Contamos ya con abundante información sobre una gran variedad de plantas y animales. Los trabajos en curso nos permitirán formular una interpretación general del significado de este fenómeno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

KIN RECOGNITION. Recopilación a cargo de Peter G. Hepper. Cambridge University Press, 1991.

COMMUNAL NESTING PATTERNS IN MICE IMPLICATE MHC GENES IN KIN RECOGNITION. C. Jo Manning, Edward K. Wakeland y Wayne K. Potts en *Nature*, volumen 360, n.º 6404, págs. 581-583; 10 de diciembre de 1992.

KIN RECOGNITION AND CANNIBALISM IN POLYPHENIC SALAMANDERS. David W. Pfennig, Paul W. Sherman y James P. Collins en *Behavioral Ecology*, vol. 5, n.º 2, págs. 225-232; verano de 1994.

De la complejidad a la perplejidad

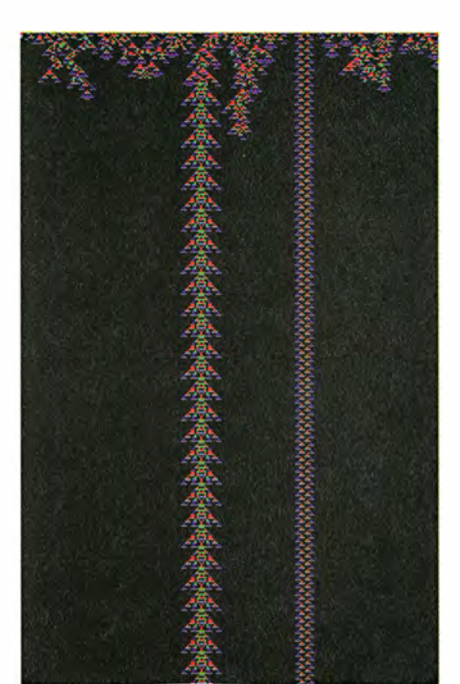
¿Puede lograr la ciencia una teoría unificada de los sistemas complejos? Hasta los expertos del Instituto Santa Fe de Nuevo México abrigan sus dudas

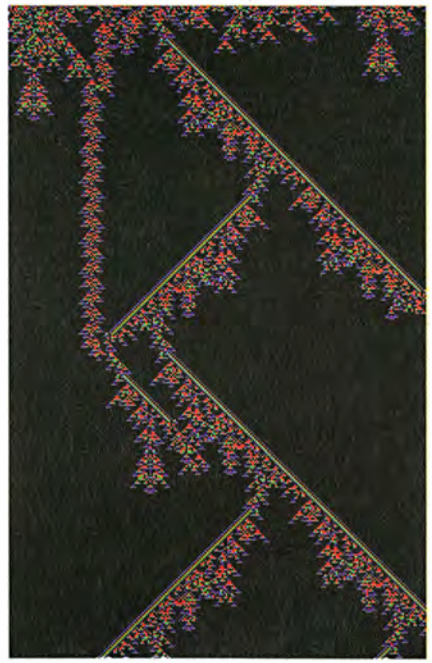
John Horgan

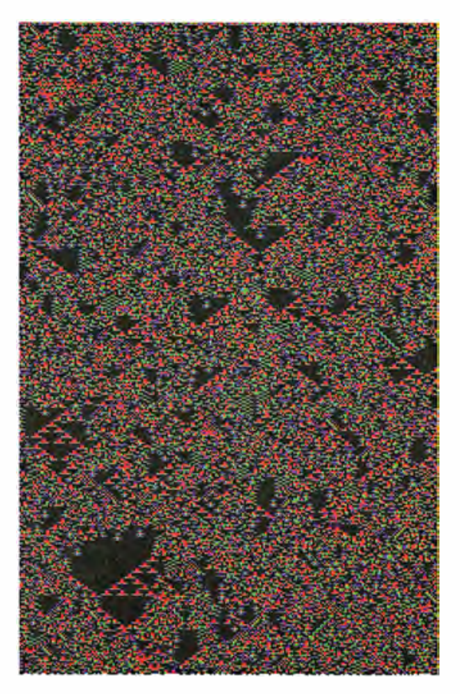
En el Museo del Arte y la Cultura de los Indios Americanos de Santa Fe, en Nuevo México, burbujean los cavas y las grandes ideas. El museo es anfitrión de una cena en honor del Instituto Santa Fe, donde personas complejas reflexionan sobre asuntos complicados. Entre los presentes, algunas de las luminarias más brillantes del Instituto, así Murray Gell-Mann, premio Nobel y codescubridor de los quarks, con su mirada de permanente escepticismo; Christopher G. Langton, profeta de la vida artificial, ataviado con su uniforme: vaqueros, botos camperos, chaleco de cuero y brazalete de plata; W. Brian Arthur, rubicundo especialista en econometría no lineal, quien ha estado recientemente recibiendo llamadas de la Casa Blanca, y Stuart A. Kauffman, corifeo intelectual de rango mundial, cuyo porte angelical va matizado de oscura preocupación. Con estos pioneros de la ciencia confraternizan diversos "amigos del instituto", desde megafilántropos como George Soros hasta novelistas de éxito, como Cormac McCarthy.

David Liddle, empresario informático que preside el patronato, pasa revista a los logros del instituto. "Hay mucho de qué ufanarse", afirma. Y ciertamente lo hay, al menos en lo atinente a las relaciones públicas. El instituto no es grande: en Santa Fe mantiene con plena dedicación a sólo seis investigadores; otros 50 miembros, "facultativos externos", trabajan en diversas instituciones. Sin embargo, en el decenio transcurrido desde su fundación, el instituto ha disfrutado de muy favorable atención de la prensa, sin faltar la de *Investigación y Ciencia.* Ha adquirido nombradía de centro puntero en el estudio de la complejidad, de lugar donde científicos poco tolerantes con la ciencia indigesta y reduccionista del pasado están creando "una forma nueva de concebir la naturaleza, la conducta social humana, la vida y el universo mismo".

Lo que Liddle no dice es que incluso algunos científicos asociados con el instituto están empezando a mostrar preocupación por la distancia que media entre toda esta retórica y la realidad. Tomemos a Jack D. Cowan, biomatemático venido de la Universidad de Chicago que contribuyó a la fundación del instituto y es miembro de su patronato. Cowan no se anda con remilgos; él mismo ha







1. EL BORDE O INSTAURACION del caos queda ilustrado por este tríptico de imágenes de un autómata celular, generadas por Chistopher G. Langton, del Instituto Santa Fe. Langton y otros han sugerido que la complejidad de un sistema puede ser equivalente a su capacidad computacional; tal capacidad alcanza un máximo en un régimen (*centro*) comprendido entre estados altamente ordenados (*izquierda*) y estados caóticos (*derecha*). Otros han puesto en tela de juicio la interpretación que Langton da a sus experimentos y la premisa fundamental de "borde del caos".

explorado los procesos neurológicos subyacentes a las barrocas configuraciones visuales que el LSD evoca. Pero algunos teóricos de Santa Fe dan muestras, para su gusto, de una "relación lengua/cerebro" demasiado alta.

Cowan encuentra que parte del trabajo que se hace en Santa Fe es interesante e importante, pero deplora la tendencia de la investigación "a degenerar en trasteo computarizado". Un número sobrado de simuladores padecen también de lo que Cowan ha dado en llamar síndrome de reminiscencia. "Dicen, 'Vea. ¿No le recuerda esto un fenómeno físico o biológico?' Saltan directamente a ello como si se tratara de un modelo decente del fenómeno. Y claro, por lo general, lo que ocurre es que sólo tiene algunas peculiaridades casuales que lo hacen parecerse a algo." El principal descubrimiento que hasta ahora ha salido del instituto, sugiere Cowan, es que "resulta muy difícil hacer ciencia sobre sistemas complejos".

Algunos residentes culpan a los medios de comunicación de las exageraciones asociadas con el instituto. "El noventa por ciento ha salido de los periodistas", afirma Arthur. El economista, empero, no puede reprimir su tirón apologeta. "Si Darwin hubiera tenido un ordenador en su escritorio", exclama, "¿quién sabe qué podría haber descubierto?". Y tanto: seguramente habría descubierto muchísimo sobre ordenadores y muy poco acerca de la naturaleza.

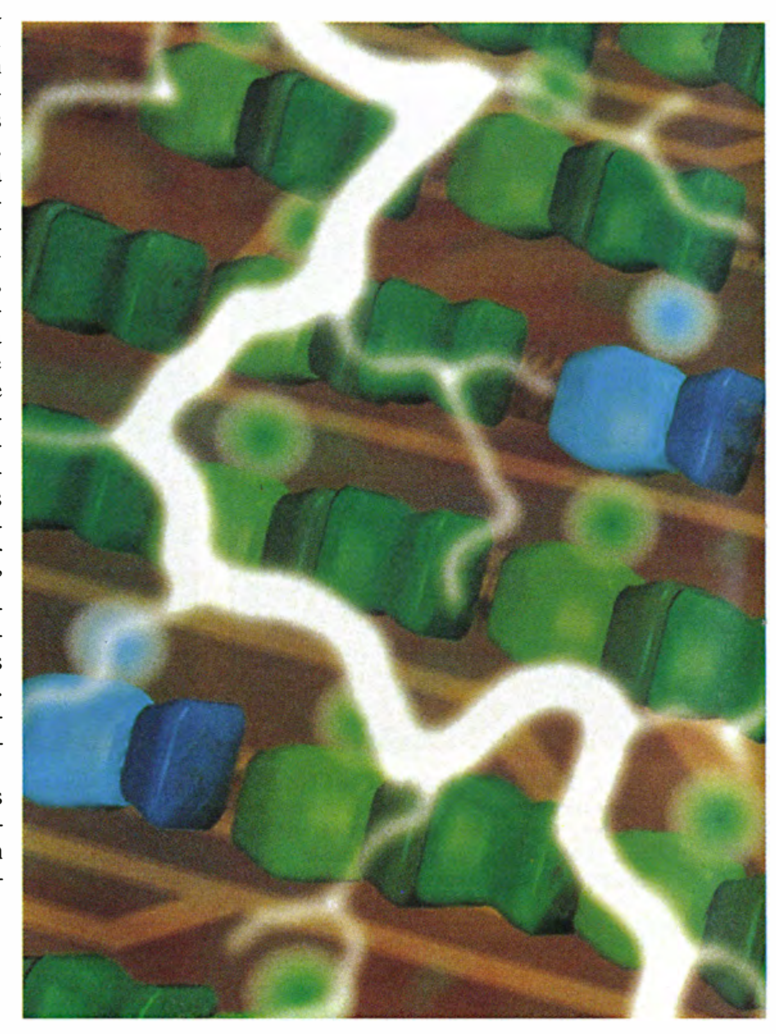
La máxima pretensión del grupo de Santa Fe es la de construir una "teoría unificada" de sistemas complejos. John H. Holland, informático de la Universidad de Michigan y del ISF, prestó su voz a esta visión, tan ambiciosa que corta el aliento, en una conferencia pronunciada hace dos años: "Muchos de los problemas de largo alcance que más nos inquietan —las balanzas comerciales, el desarrollo viable, el sida, los defectos congénitos, la salud mental, los virus informáticos— se centran en sistemas de extraordinaria complejidad. Los sistemas donde residen tales problemas —las economías nacionales, los sistemas ecológicos e inmunitarios, los embriones, los sistemas nerviosos, las redes informáticas— parecen mostrar tanta diversidad como los problemas. Sin embargo, pese a las apariencias, los sistemas comparten en realidad características significativas, tanto, que nosotros, en el Instituto Santa Fe, las clasificamos bajo un único concepto, el de 'sistemas complejos adaptativos'. No es mera terminología que hayamos acuñado en una noche de verano. Alude a nuestra intuición de que existen principios generales que gobiernan todo el comportamiento complejo adaptativo, principios que apuntan hacia soluciones de los problemas pendientes." Holland, preciso es decirlo, es tenido por uno de los más modestos expertos en complejidad.

Algunos investigadores niegan ahora que el objetivo sea una teoría unificada. "Ni siquiera sé qué entender por eso", explica Melanie Mitchell, antigua discípula de Holland, hoy en el Instituto Santa Fe. "A un cierto nivel se podría decir que todos los sistemas complejos son manifestaciones de unos mismos principios subyacentes, pero no creo que eso sirva de gran cosa." Sin embargo, despojado de esta visión unificadora, el ISF se convierte en otro lugar más donde los investigadores se valen de ordenadores y de otros instrumentos para abordar los problemas de sus respectivas disciplinas. ¿No es eso acaso lo que hace cualquier científico?

Los familiarizados con la historia de otras potenciales teorías de unificación no se muestran entusiastas sobre el futuro de sus cofrades de Santa Fe. Entre los escépticos se cuenta Herbert A. Simon, de la Universidad Carnegie-Mellon, premio Nobel de economía, que ha contribuido también a la inteligencia artificial y a la sociobiología. "Casi todos quienes hablan de esas magnas teorías están infectados de matemáticas", opina. "Creo que la noción de unificación se va a desinflar como un globo". Rolf Landauer, de IBM, que ha dedicado su carrera a la exploración de las conexiones entre la física, la computación y la información, está de acuerdo. Acusa a los teóricos de la complejidad de buscar un "criterio mágico" que les ayude a descifrar todas las intrincadas marañas de la naturaleza. "No existe tal criterio", concluye Landauer.

Las dificultades que presenta la complejidad empiezan ya en el propio término. Los investigadores en complejidad han batallado para diferenciar su disciplina de la llamada "caos". Cuando las aguas volvieron a su cauce resultó que el caos se refería un conjunto restringido de fenómenos que evolucionan de formas predictiblemente impredictibles. Varias han sido las tentativas de producir una definición de complejidad igual de precisa. En la definición más ampliamente voceada entra "el borde del caos". La idea fundamental es que nada nuevo puede emerger de sistemas con alto grado de orden y estabilidad, como los cristales. Por otra parte, los sistemas completamente caóticos, como los fluidos turbulentos o los gases calientes, son *demasiado* informes. Los objetos realmente complejos —las amebas, los especuladores en bonos y similares— hacen aparición en la frontera entre el orden rígido y el azar.

Las crónicas de mayor difusión atribuyen la idea a Christopher Langton y a su colaborador Norman H. Packard (quien acuñó la frase). En experimentos con autómatas celulares llegaron a la conclusión de que la capacidad computacional de un sistema —esto es, su capacidad para almacenar y procesar información— alcanza su máximo en un estrecho régimen situado entre el comporta-



miento altamente periódico y el comportamiento caótico. Pero las investigaciones sobre autómatas celulares de James P. Crutchfield y de Mitchell, del Instituto Santa Fe, no confirmaban las conclusiones de Packard y Langton. Crutchfield y Mitchell ponen asimismo en tela de juicio que "una suerte de tendencia hacia capacidades de computación universal constituya una fuerza importante en la evolución de los organismos biológicos". Mitchell se queja de que, en respuesta a estas críticas, los proponentes del borde del caos cambian continuamente su definición.

Se han propuesto otras definiciones de complejidad —31 cuando menos, según una lista recopilada hace varios años por Seth Lloyd, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, físico adjunto al de Santa Fe. La mayoría de ellas se valen de los conceptos de entropía, aleatoriedad, información y términos de parecido tenor que han demostrado ser notoriamente resbaladizos. Todas las definiciones tienen inconvenientes. Por ejemplo, la complejidad informacional algorítmica, propuesta por Gregory J. Chaitin, de IBM, sostiene que la complejidad de un sistema es representable por el más breve programa de ordenador que lo describa. Pero según ese criterio, un texto creado por un equipo de chimpancés mecanógrafos sería más complejo —por más aleatorio— que *El Quijote*.

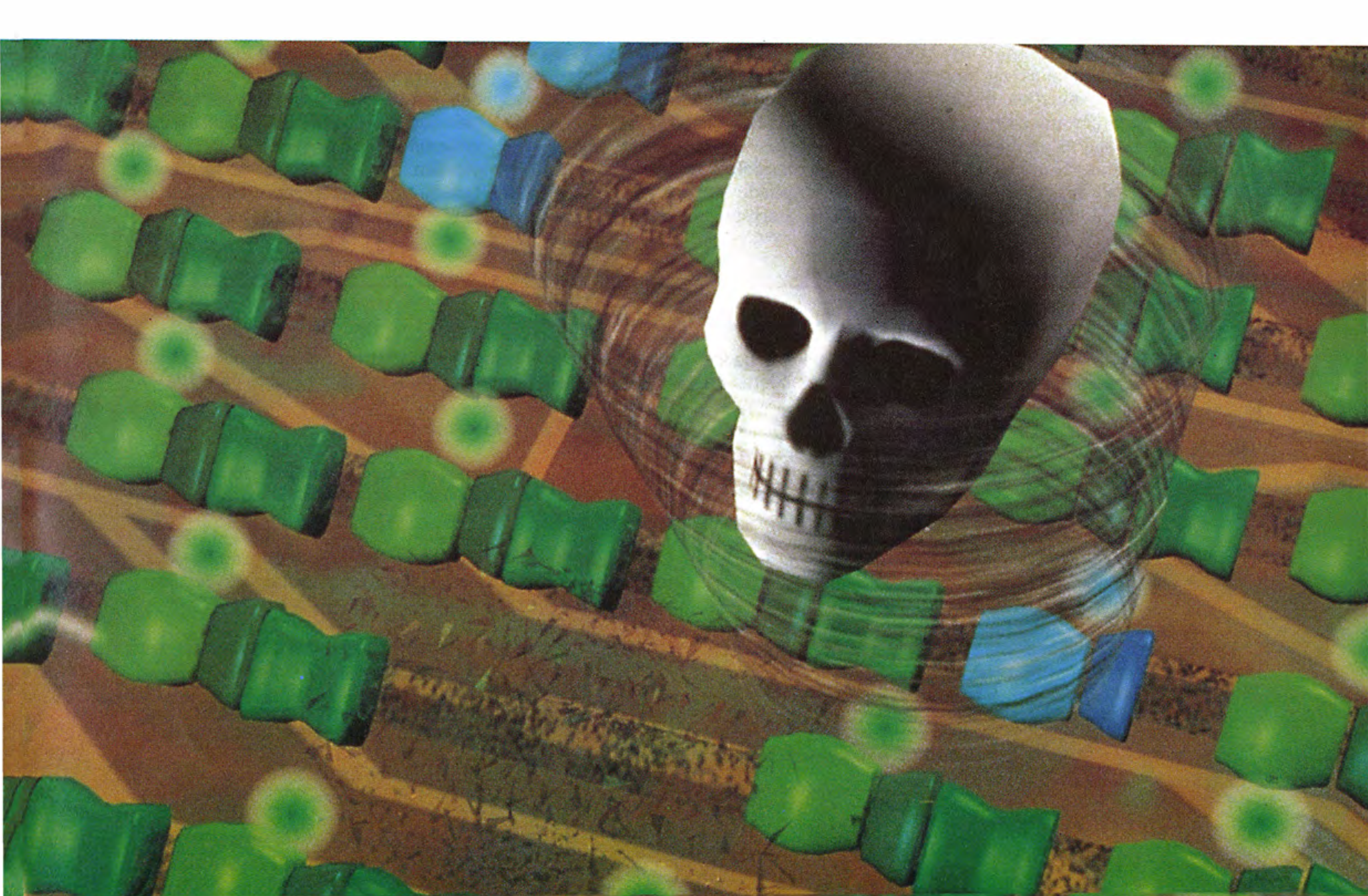
La poética de la vida artificial

Tales problemas ponen de relieve el hecho curioso de que, en cierto sentido, la complejidad existe en el ojo del observador. Los investigadores han debatido en ocasiones si la complejidad ha quedado tan vacía de contenido, que debiera abandonarse, pero llegan siempre a la conclusión de que el término es, publicitariamente, demasiado valioso. En teoría de complejidad es frecuente utilizar "interesante" como sinónimo de "complejo". Pero, ¿qué organismo gubernamental proveería fondos para la investigación de una "teoría unificada de cosas interesantes"? (El Instituto Santa Fe, sea dicho de paso, recibirá del gobierno estadounidense alrededor de la mitad de los 5 millones de dólares de su presupuesto de 1995 y el resto, de benefactores particulares.)

Los expertos pueden disentir sobre qué es lo que están estudiando, pero casi todos coinciden en cómo deben estudiarlo: con ordenadores. Esta fe en los ordenadores se encarna en la llamada "vida artificial", subdisciplina que por méritos propios ha recabado mucha atención. La vida artificial hereda la filosofía de la inteligencia artificial, varios decenios más antigua. La investigación en inteligencia artificial persigue la comprensión de la mente mediante remedos informáticos; quienes proponen la vida artificial albergan la esperanza de llegar a comprender un amplio abanico de fenómenos biológicos. Lo mismo que la inteligencia artificial, la vida artificial más que resultados tangibles lo que ha generado es una retórica portentosa.

El año pasado, en el número inaugural de la revista *Artificial Life*, Langton proclamaba: "... la vida artificial nos enseñará mucha biología,

2. LA VIDA ARTIFICIAL, uno de los principales subcampos de los estudios de complejidad, es, según un crítico, "ciencia sin hechos". Sobresale, en cambio, en el grafismo informático. Esta imagen de Thomas R. Ray, de la Universidad de Delaware y el Instituto Santa Fe, sirve para ilustrar la evolución de la vida en el ciberespacio. Los objetos verdes y azules son programas autorreplicantes; los centelleos representan "mutaciones" aleatorias. Y la calavera es la Parca, una rutina que induce presión selectiva "matando" a los programas menos aptos.



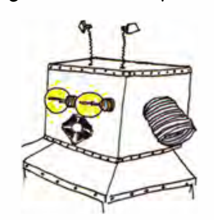
muchas cosas que no habríamos aprendido estudiando los productos naturales de la biología sola. La vida artificial acabará desbordando a la biología y llegará hasta un reino para el que aún no tenemos nombre, pero que habrá de dar cabida en una concepción generalizada de la naturaleza a la cultura y a nuestra tecnología."

Langton ha promulgado una visión conocida por "vida artificial fuerte". Si un programador crease un mundo de "moléculas" que, atendiendo a reglas similares a las de la química, se organizasen espontáneamente en entidades que se alimentan, se reproducen y evolucionan, Langton consideraría que tales entidades viven, "aunque sea en un ordenador". Como no podía dejar de ocurrir, la vida artificial ha engendrado sociedades artificiales. Joshua M. Epstein, un experto en ciencias políticas que va y viene entre Santa Fe y la Institución Brookings de Washington D.C., declara que las simulaciones informáticas de la guerra, del comercio y de otros fenómenos sociales "cambiarán de modo fundamental la forma en que se realizan las ciencias sociales".

La vida artificial —y todo el campo de la complejidad— parece estar basado en un silogismo seductor: hay sistemas sencillos de reglas matemáticas que, obedecidas por un ordenador, originan configuraciones complicadas en grado sumo; pero también el mundo contiene multitud de configuraciones complicadas en extremo; por consiguiente, muchos fenómenos extremadamente complicados del mundo están gobernados por reglas subyacentes sencillas. Con ayuda de poderosos ordenadores, los científicos pueden extraer dichas reglas.

La cibernética y otras catástrofes

No han sido los estudios de complejidad los primeros que en este siglo han hecho pensar en la creación de una teoría matemática de casi todo. He aquí algunos notables precursores:



Cibernética. En su obra de 1948, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, el matemático Norbert Wiener se proponía mostrar que una teoría basada en la realimentación y en otras nociones de la ingeniería podría explicar no sólo el funcionamiento de las máquinas, sino también fenómenos biológicos o sociales. El sueño de Wiener sigue sin cumplirse, pero su neologismo, basado en la palabra griega *kybernetes*, piloto, sigue siendo una reliquia venerada en la cultura cibernética.



Teoría de catástrofes. El matemático francés René Thom desarrolló la teoría de catástrofes en los años sesenta, con carácter puramente matemático. Pero más tarde, Thom y otros proclamaron que la teoría podía proporcionar una comprensión profunda y precisa de un amplio abanico de fenómenos que presentan bruscas discontinuidades, desde la metamorfosis de una oruga hasta el desplome de las civilizaciones. Tras una fase de frenético interés a finales de los setenta, la propia teoría de

Este silogismo se refutó en un brillante artículo publicado el año pasado en *Science*. Los autores, encabezados por la filósofa Naomi Oreskes, del Colegio Darmouth, advierten que "la verificación y validación de modelos numéricos de sistemas naturales es imposible". Las únicas proposiciones que pueden verificarse —es decir, que cabe demostrar son verdaderas— conciernen a sistemas "cerrados", basados en las matemáticas y en la lógica. Los sistemas naturales son abiertos: en el mejor de los casos, nuestro conocimiento de ellos es siempre parcial, aproximativo.

"Un modelo, lo mismo que una novela, puede ser convincente; puede parecer correcto si es conforme con nuestra experiencia del mundo natural", exponen Oreskes y sus colegas. "Pero, al igual que con los personajes de una novela, cabe preguntarse cuánto se ha tomado de la vida real y cuánto es artificio, de los modelos podemos preguntar otro tanto: ¿cuánto se basa en la observación y medición de fenómenos accesibles, cuánto se funda en juicios informados y cuánto es pura conveniencia?"

Los modelos numéricos funcionan en astronomía y en física, debido a que los objetos y las fuerzas se ajustan con exactitud a sus definiciones matemáticas. Las teorías matemáticas pierden vigor cuando se aplican a fenómenos más complejos y, de forma notable, a cualquier ente del

Discordia en las definiciones

¿Pueden los investigadores crear una teoría unificada de los sistemas complejos, si ellos mismos no están de acuerdo en qué entender por complejidad? Seth Lloyd ha recopilado una lista de 31 distintas formas de definirla. Sirvan de muestra:

Entropía. La complejidad es lo mismo que entropía, o desorden de un sistema, medida por la termodinámica.

Información. La complejidad es igual a la capacidad de un sistema para sorprender o informar a un observador.

Dimensión fractal. La borrosidad de un sistema, el grado de detalle que exhibe a escalas cada vez menores.

Complejidad efectiva. El grado de regularidad (más que de aleatoriedad) que manifiesta un sistema.

Complejidad jerárquica. La diversidad exhibida por los diferentes niveles de un sistema estructurado jerárquicamente.

Complejidad gramatical. El grado de universalidad del lenguaje preciso para describir un sistema.

Profundidad termodinámica. La cantidad de recursos termodinámicos requeridos para ensamblar un sistema partiendo de cero.

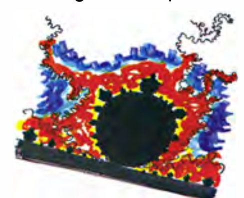
Complejidad temporal-computacional. El tiempo que requiere un ordenador para describir un sistema (o resolver un problema.)

Complejidad espacial-computacional. La cantidad de memoria de ordenador que exige la descripción de un sistema.

Información mutua. El grado en que una parte de un sistema contiene información sobre otras partes, o se parece a ellas.

catástrofes se venía abajo; un crítico concluía que el trabajo de Thom no proporciona nueva información sobre cosa alguna.

Caos. Algunos especialistas en teoría del caos insisten en que su especialidad, que se ocupa de sistemas que exhiben bifurcación, sensibilidad a las condiciones iniciales y otros comportamientos definidos matemáticamente, es todavía de vital importancia. Pero el matemático francés David Ruelle, uno de los pioneros de la especialidad, señaló hace ya cuatro años que a pesar de las frecuentes y triunfales declaraciones que anuncian "nuevos" progresos, la producción de descubrimientos interesantes [en teoría del caos] ha ido en declive.



Teoría de la información. Creada por Claude E. Shannon en 1948, la teoría proporcionaba un método para cuantificar el contenido de información de un mensaje. La hipótesis sirve todavía de fundamento teórico para la codificación, compresión, cifrado y demás aspectos del procesamiento de información. Se ha querido aplicar la teoría de información a otras disciplinas, desde la física y la biología hasta la psicología y las artes; en general, sin embargo, tales esfuerzos han desem-bocado en el fracaso. Parte de la culpa reside en la propia teoría, incapaz de abordar el problema del significado.



campo biológico. Como ha señalado el zoólogo Ernst Mayr, de Harvard, cada organismo es único y cambia además de un momento a otro. Por esa razón, la biología ha resistido la matematización.

Sorprendentemente, Langton parece aceptar la posibilidad de que la vida artificial no alcance el rigor de la investigación más "pasada de moda". En el futuro, sugiere, la ciencia puede hacerse menos "lineal" y más "poética". "La poesía constituye un uso muy poco lineal del lenguaje; en ella, el significado es más que la suma de las partes", explica.

Una crítica a la criticalidad

Según el biólogo John Maynard Smith, de la Universidad de Sussex, puede que la vida artificial haya alcanzado esta meta. Smith, que se cuenta entre los primeros en utilizar matemáticas en biología, se interesó por el trabajo que se hacía en Santa Fe. Pero su conclusión es que la vida artificial es "básicamente una ciencia sin hechos". Durante su última visita, recuerda, "la única ocasión en que se mencionó la palabra hechos fue cuando lo hice yo, y les pareció de bastante mal gusto".

No todos los especialistas en complejidad están dispuestos a aceptar que su especialidad esté condenada a ser "ciencia blanda". No, ciertamente, Per Bak, físico del Laboratorio Nacional de Brookhaven, hoy en Santa Fe. Bak, de aspecto formal y sabihondo, es, amén de belicoso, un hervidero de opiniones. Afirma, por ejemplo, que la física de partículas y la física de la materia condensada han rebasado ya sus momentos de esplendor. También el caos había recorrido prácticamente todo su curso en 1985, dos años antes de que James Gleick publicara *Chaos*, libro de impacto demoledor. "¡Así son las cosas!", exclama Bak. "En cuanto algo llega a las masas, ya está pasado!" (La complejidad, inútil decirlo, es la excepción a la regla de Bak.)

Bak y otros han desarrollado la que algunos consideran la principal candidata a teoría unificada de la complejidad. Para Bak, el sistema paradigmático es un montón de arena. Al ir añadiendo arena a lo alto del montón, éste, se "organiza" a sí mismo mediante avalanchas, adoptando lo que Bak llama un estado crítico. Al representar en unos ejes de coordenadas el tamaño y la frecuencia de la avalanchas, los resultados obedecen a una ley potencial: la probabilidad de las avalanchas disminuye al aumentar el tamaño de las mismas.

Bak señala que muchos fenómenos —los terremotos, las fluctuaciones del mercado de valores, la extinción de especies e incluso las ondas cerebrales humanas— exhiben pautas similares. Concluye que "es forzoso que esto responda a una teoría". Dicha teoría podría explicar por qué los terremotos pequeños son cosa corriente y excepcional los grandes, por qué hay especies que perduran millones de años y después se extinguen, por qué se producen caídas en los mercados de valores y por qué la mente humana consigue responder tan rápidamente a los datos que le llegan.

"No podemos explicarlo todo acerca de todo, pero sí algo acerca de todo", afirma Bak. El trabajo en sistemas complejos, añade, provocará "una revolución" en ciencias tradicionalmente "blandas", como la economía, la psicología y la biología evolutiva. "Estas disciplinas quedarán convertidas en ciencias duras en los próximos años, como lo hicieran antes la física de partículas y la física del estado sólido."

En su libro *Earth in the Balance*, un éxito de ventas, el vicepresidente Al Gore decía que la teoría de Bak no sólo le había ayudado a comprender la fragilidad del medio ambiente, sino también "el cambio en mi propia vida". Pero Sidney R. Nagel, de la Universidad de Chicago, afirma que el modelo de Bak ni siquiera proporciona una descripción valiosa de un montón de arena. Tanto él como otros investigadores de Chicago hallaron que sus propios montones tendían a oscilar entre la inmovilidad y las avalanchas a gran escala, en lugar de atenerse a una ley potencial.

Bak replica que otros experimentos con montones de arena confirman su modelo. Ello no obstante, puede que el modelo sea tan general y de naturaleza tan estadística, que ni siquiera para arroje luz sobre los mismos sistemas que describe. Después de todo, muchos fenómenos son descriptibles mediante una curva acampanada, o curva de Gauss, correspondiente a una distribución normal de probabilidad. Pero pocos científicos defenderían que las puntuaciones de las personas en los tests de inteligencia y la luminosidad aparente de las galaxias hayan de ser consecuencia de causas comunes. "Si una teoría es aplicable a todo, puede que en realidad no sea aplicable a nada", apostilla Crutchfield. Y añade que en una teoría útil "no sólo se necesitan estadísticas, sino también mecanismos".

Entre los escépticos se cuenta también el premio Nobel Philip W. Anderson, de la Universidad de Princeton. Anderson, un físico que trabaja en materia condensada, está en la directiva del ISF. En "More Is Different", ensayo publicado en *Science* en 1972, Anderson sostenía que la física de partículas y, en general, todos los enfoques reduccionistas tienen sólo una capacidad limitada para explicar el mundo. La realidad presenta una estructura jerárquica, argüía Anderson, y cada nivel es independiente, en cierta medida, de los niveles situados por encima y por debajo. "En cada estadio son necesarias leyes nuevas, que exigen inspiración y originalidad en grado no menor que en el nivel previo", seña-



3. LA SIMETRIA es un fenómeno habitual en los sitemas biológicos. Sobre todo en el dominio molecular, como puede apreciarse en la estructura de este proteosoma de *Thermoplasma acidophilum*.

laba. "La psicología no es biología aplicada, ni la biología es química aplicada."

"More is different" se convirtió en banderín de enganche en pro del caos y la complejidad. Irónicamente, el principio de Anderson sugiere que estos esfuerzos antirreduccionistas pueden no culminar nunca en una teoría unificada de sistemas complejos, capaz de iluminarlo todo. Anderson reconoce que así es. "No creo que haya una teoría de todo", comenta. "Sí creo que existen principios básicos de muy amplia generalidad", como la mecánica cuántica, la mecánica estadística, la termodinámica y la ruptura de la simetría. "Pero no se debe caer en la tentación de creer que, cuando se tiene un buen principio general en un nivel, va a funcionar en todos los niveles."

Anderson acepta la concepción de la naturaleza descrita por el biólogo evolucionista Stephen Jay Gould, de Harvard, quien insiste en que la vida está moldeada en menor medida por leyes determinísticas que por contingencias y circunstancias impredictibles. "Imagino que el prejuicio que estoy tratando de expresar constituye un prejuicio en favor de la historia natural", confiesa Anderson.

Las opiniones de Anderson contradicen frontalmente a las de Stuart Kauffman, uno de los más ambiciosos defensores de la vida artificial. Kauffman ha invertido decenios esforzándose en demostrar, mediante refinadas simulaciones informáticas, que la teoría darwinista es incapaz, por sí sola, de explicar el origen de la vida o su posterior evolución. Afirma compartir la preocupación de su maestro, John Maynard Smith, por el contenido científico de ciertas investigaciones sobre vida artificial. "En cierto punto, la vida artificial va encaminándose hacia algún lugar en el que no sé decir dónde se encuentra la divisoria entre hablar acerca del mundo —entiéndase, todo lo que hay ahí— y los juegos de ordenador muy elaborados, las formas artísticas o los juguetes." Por su parte, añade Kauffman, cuando él hace simulaciones computarizadas "está siempre intentando averiguar cómo funciona alguna cosa del mundo, o casi siempre".

Las simulaciones de Kauffman le han llevado a varias conclusiones. Una de ellas, que, cuando un sistema de sustancias químicas sencillas alcanza cierto grado de complejidad o interconexión (que Kauffman ha enlazado tanto con la noción de borde del caos como con la criticalidad autoorganizada de Bak), el sistema experimenta una transición impresionante, un cambio de fase. Las moléculas comienzan a combinarse espontáneamente, creando moléculas de creciente complejidad y capacidad catalítica. Kauffman ha defendido que fue este proceso de "autocatálisis", y no la formación fortuita de una molécula con capacidad para replicarse y evolucionar, lo que originó la vida.

"Oscurantismo y mistificación"

Kauffman ha propuesto también que las organizaciones de genes interactuantes no evolucionan al azar, sino que convergen hacia un número relativamente pequeño de configuraciones o "atractores", por usar uno de los términos favoritos de la teoría del caos. Este principio de ordenación, al que Kauffman denomina "anticaos", pudo haber desempeñado mayor papel que la selección natural para guiar la evolución de la vida. Con mayor generalidad, Kauffman opina que sus simulaciones pueden conducir al descubrimiento de una "nueva fuerza fundamental" que actúe en sentido contrario a la tendencia universal hacia el desorden, exigida por el segundo principio de la termodinámica.

En un libro de inminente publicación, *At Home in the Universe*, Kauffman afirma que tanto el origen de la vida como su evolución subsiguiente no fueron "enormemente improbables", sino, en cierto sentido, fundamentalmente inevitables; es casi seguro que la vida, tal vez similar a la nuestra, existe en algún otro lugar del universo. Los científicos se han trabado en interminables debates sobre esta cuestión. Unos apoyan el punto de vista de Kauffman; otros,

siguiendo al biólogo francés Jacques Monod, defienden que la vida es, en realidad, "sumamente improbable". Como no tenemos conocimiento de que haya vida en otros lugares, la cuestión pertenece al dominio de lo opinable y las simulaciones informáticas, por muchas que sean, no podrán hacer que lo sea menos.

Además, Murray Gell-Mann niega que la ciencia necesite una nueva fuerza para explicar la aparición de orden y complejidad. En su libro de 1994, *The Quark and the Jaguar*, Gell-Mann esboza una concepción de la naturaleza reduccionista. La naturaleza probabilística de la mecánica cuántica permite que el universo se despliegue de infinito número de formas, algunas de las cuales engendran condiciones que desembocan en la aparición de fenómenos complejos. Por lo que al segundo principio de la termodinámica se refiere, permite un aumento temporal de orden en sistemas relativamente aislados, movidos por energía, como la Tierra.

"Cuando se contempla el mundo de esa manera, ¡todo encaja!", exclama Gell-Mann. "¡Uno ya no se siente torturado por preguntas extrañas!" Insiste en que los investigadores tienen mucho que aprender de los sistemas complejos; por eso contribuyó a fundar el Instituto Santa Fe. "A lo que procuro oponerme es a una cierta tendencia hacia el oscurantismo y la mistificación", recalca.

Es posible que los dedicados a la complejidad, aunque no logren crear una ciencia para el próximo milenio, sí alcancen a esbozar los contornos de lo cognoscible. El Instituto Santa Fe parecía estar sugiriendo tal posibilidad el año pasado cuando albergó un simposio sobre "los límites del conocimiento científico". Durante tres días, una veintena de científicos experimentales, matemáticos y filósofos estuvo debatiendo si a la ciencia le sería posible saber qué es lo que no puede conocer. Después de todo, logros de la ciencia del siglo XX como la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica, el teorema de Gödel o la teoría del caos imponen límites al conocimiento.

Algunos participantes expresaron la esperanza de que, conforme aumente la potencia de los ordenadores, crecerá la capacidad de la ciencia para predecir, controlar y comprender la naturaleza. Otros opusieron objeciones. A Roger N. Shepard, psicólogo de la Universidad de Stanford, le preocupaba que, aun cuando pudieran aprehenderse en los ordenadores las complicaciones de la naturaleza, dichos modelos resultaran tan intrincados que escaparan a la comprensión humana. Francisco Antonio Doria, un matemático brasileño, sonrió con aire pesaroso y murmuró: "Pasamos de la complejidad a la perplejidad." Todos asintieron con el gesto.

Otros estudiosos de la complejidad

El Instituto Santa Fe no posee el monopolio de las grandes ideas asociadas a la complejidad. Dos expertos más, por lo menos, han proclamado recientemente logros que trascienden del posible trabajo que pueda estar realizándose en Santa Fe.

Uno de ellos es Ilya Prigogine, químico belga de origen ruso. Prigogine fue premio Nobel de 1977, por el estudio de las llamadas estructuras disipativas, y de forma notable, de células químicas "bombeadas" que jamás alcanzan el equilibrio, sino que oscilan entre múltiples estados. Basándose en estos experimentos, Prigogine, que oscila entre los Institutos Internacionales Solvay de Bélgica y la Universidad de Texas en Austin, ha construido una torre de ideas sobre autoorganización, emergencia, sobre las conexiones entre orden y desorden... en una palabra: complejidad.

La gran obsesión de Prigogine es el tiempo. Sostiene que la física no ha prestado suficiente atención al hecho evidente de que el tiempo avanza sólo en un sentido. Prigogine, que ha cumplido 78 años, acaba de formular una nueva teoría que, según afirma, por fin le hace justicia a la naturaleza irreversible de la realidad. La teoría probabilística elimina las paradojas filosóficas que tantos incordios han creado en mecánica cuántica y la reconcilia con la mecánica clásica, con la mecánica no lineal y con la termodinámica. A mayores, afirma Prigogine, la teoría contribuirá a cerrar el vano entre las ciencias y las humanidades, amén de provocar el "re-embeleso" por la naturaleza.



Ilya Prigogine

El futurólogo Alvin Toffler (renombrado mentor de Newt Gingrich, Presidente de la Cámara de Representantes estadounidense) ha comparado a Prigogine con Isaac Newton y profetizado que la ciencia del futuro que es glosado en "La tercera ola" será ciencia "prigogínica". Pero son muchos los físicos que, reconociendo las excelencias de Prigogine en la disquisición filosófica, opinan que su contribución concreta a la ciencia es pequeña o nula. "Que yo sepa, no ha explicado ni un solo fenómeno", dice Pierre C. Hohenberg, de la Universidad de Yale, especialista en formación de configuraciones.

Desmarcado, pero atento, tenemos a Stephen Wolfram, otro personaje de peso. Este físico, niño prodigio de origen británico, contribuyó a engendrar el campo de la complejidad en los primeros años ochenta, antes de cambiar de rumbo y desarrollar y comercializar su célebre programa de cálculo, Mathematica.

Wolfram está decepcionado con lo que el Instituto Santa Fe ha ido exudando a lo largo del pasado decenio. "No puedo menos que sonreír ante esos libros tan encomiásticos", dice. Wolfram revela que está escribiendo un libro que va a resolver muchos de los problemas fundamentales de la disciplina, "pero todavía no puedo hablar de él".

Después habla del libro, pero sólo un poquito. Invariablemente, desde los tiempos de Newton, la ciencia ha estado dominada por la fe en la potencia de las matemáticas y, en particular, de las ecuaciones diferenciales. Wolfram defenderá en su libro que sistemas sencillos de reglas lógicas —como las que dan origen a los autómatas celulares, por ejemplo— podrían proporcionar un lenguaje mucho más poderoso para la descripción de la realidad.

Wolfram quiere evitar las exageradas proclamas que han infestado al Instituto Santa Fe. "No creo que lo que yo produzca sea una teoría de todo", señala; se sentirá "muy feliz" si su logro resulta ser meramente igual de importante que, pongamos por caso, el descubrimiento del cálculo diferencial de Newton.

Ciencia y empresa

Economía

Entre la computación y el análisis

La ley de la oferta y la demanda, a saber, que se compra menos si los precios suben y más si bajan, se cuenta entre las más seguras que puede ofrecer la economía. En estos últimos tiempos, los propios métodos de la economía han obedecido a esta ley, con el resultado de que los economistas están modelando teorías de nuevo estilo.

El precio que viene bajando es el informático. Durante los últimos veinte años por lo menos, en un día cualquiera, el costo de la suma o la multiplicación de dos números ha ido cayendo a la mitad del que era 18 meses antes. En 1943, en Los Alamos, una calculadora era una mujer que efectuaba cálculos para un equipo organizado por Richard Feynman. En nuestros días, los sistemas de cientos de ecuaciones constituyen tareas tratables con ordenadores personales de tipo medio.

Este cambio cuantitativo se ha traducido en un cambio cualitativo. En lugar de razonar sobre la economía basándose en unas pocas hipótesis sumamente simplificadas, matemáticamente tratables, los investigadores pueden construir modelos más realistas del comportamiento económico y estudiar cómo funcionan. Esta noción ha ido abriéndose paso en todas las ciencias.

En un libro recién aparecido, *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*, David J. Depew y Bruce H. Weber detectan estadios similares en la teoría de la evolución. Desde que ésta fue anunciada en 1859 por Charles Darwin hasta 1900 tuvo lugar el estadio precuantitativo (por así decirlo); desde 1900 hasta 1950 se desarrolló el estadio "boltzmaniano", estadístico; por último, las simulaciones computarizadas.

El estadio estadístico es el que les resulta más familiar a la mayoría de los observadores de la ciencia. Ludwig Boltzmann introdujo en física métodos estadísticos para tratar la conducta agregada de un gas. En 1877 no era posible imaginar siquiera el seguimiento de la historia individual de millares de moléculas de gas chocando entre sí, por lo que Boltmann optó por atender a su comportamiento medio, para lo cual la teoría estadística resulta adecuada.

La economía está poniendo punto final a su estadio boltzmaniano. Las nociones estadísticas que utiliza, perfeccionadas en los años treinta, se idearon para experimentos de carácter agronómico. Durante los dos decenios siguientes, estas técnicas se extendieron al resto de la economía, permitiendo deducir a partir de datos macroeconómicos, como los índices de precios, propiedades de los actores individuales.

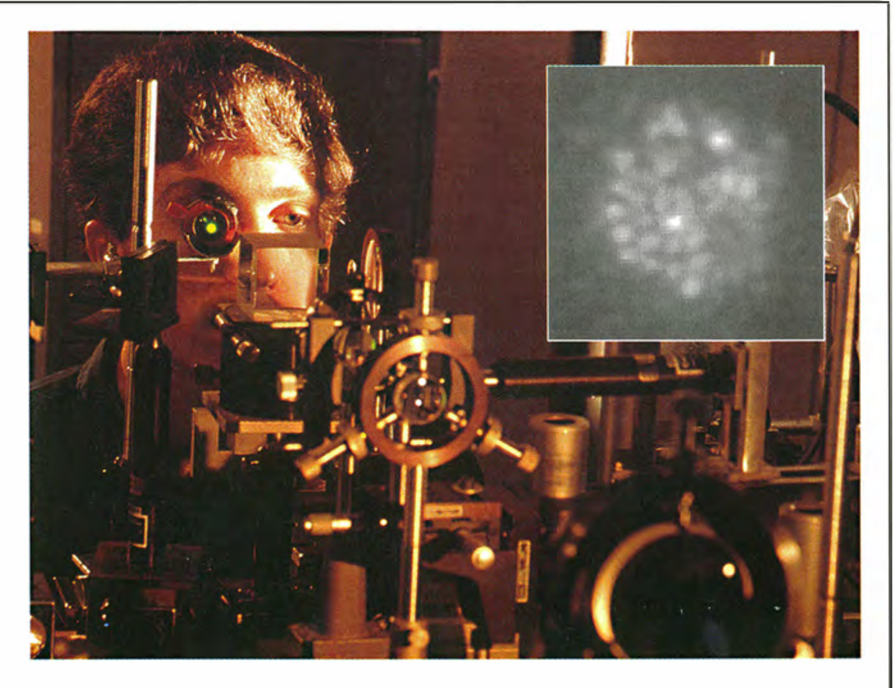
En las discusiones de política monetaria, por ejemplo, el estadio precuantitativo se ocupa de cuestiones del tenor siguiente: "¿Debe el gobierno intervenir en los mercados financieros?" y "Parece razonable que la elevación de los tipos de interés restrinja la demanda y reduzca el crecimiento". Los análisis de tipo boltzmaniano examinan si los datos numéricos que recopila el gobierno demuestran correlaciones entre el tipo de descuento y el producto nacional bruto. La era boltzmaniana concluye cuando los economistas disponen de la capacidad de cómputo suficiente para la verificación directa de sus ideas sobre la interacción en masa de las moléculas de la conducta económica. Suponiendo que los investigadores se pongan de acuerdo sobre los comportamientos económicos subyacentes, las respuestas quedarán sin oscurecer por todos los

Ver las células que ven

Desde que se descubrieron los conos y bastoncitos del ojo se ha soñado con observarlos vivos y en acción. Pero los fotorreceptores de la retina, que convierte la luz en señales eléctricas que el cerebro pueda procesar, son tan minúsculos y sus destellos de actividad tan cortos, que no había forma de conseguirlo.

Hasta que el otoño pasado un equipo dirigido por David R. Williams, de la Universidad de Rochester, pudo fotografiarlos. Mediante un láser iluminaron la retina; con una cámara de alta resolución, similar a las empleadas por los astrónomos, registraron la imagen. Los conos, que se muestran en el recuadro en blanco y negro, miden unos tres micrometros de diámetro y a ellos se debe la visión diurna y la percepción de los colores.

MARGUERITE HOLLOWAY



elementos de confusión que acompañan a los datos reales.

Esta historia de progreso evolutivo hace resaltar las dos tradiciones intelectuales contrapuestas —con diferentes actitudes en cuanto a la computación— que vienen coexistiendo desde hace mucho tiempo. En la tradición griega, los teóricos demuestran resultados partiendo de principios teóricos. La demostración del teorema de Pitágoras, por ejemplo, no depende de los tamaños concretos de los triángulos rectángulos. La tradición babilónica, por el contrario, descubre "por fuerza bruta" que un millón de triángulos rectángulos diferentes parecen mostrar todos la misma relación entre los cuadrados de sus lados.

En la ciencia económica moderna, la tradición griega ha cosechado éxitos en la obra de premios Nobel como Paul A. Samuelson y Kenneth J. Arrow, que aplicaron razonamientos matemáticos a un mínimo de datos. La tradición babilónica ha experimentado más altibajos: en tiempos de Isaac Newton permitió el cálculo de costos hipotéticos, al objeto de demostrar que el drenaje de los humedales de Somerset debería correr a cargo del erario público. En 1973, Wassily Leontief ganó un premio Nobel por el análisis input-output, mas su trabajo tuvo escasa aplicación práctica.

Desde entonces, la ley de la oferta y la demanda, en conjunción con los costos siempre decrecientes de computación, ha condenado a muerte la tradición griega. Los análisis elegantes siguen costando el mismo tiempo y esfuerzo que siempre costó, mientras que la molienda de números se vuelve cada vez más barata. Las clases de preguntas que los nuevos economistas babilónicos se están planteando son más susceptibles de respuesta, por lo que serán formuladas con mayor frecuencia. Así funciona el mercado de ideas.

DONALD N. MCCLOSKEY
Catedrático de historia económica
Universidad de Iowa

Patología vegetal

Estimulación de los mecanismos naturales de defensa

Se llama mal de Panamá la enfermedad de marchitamiento producida por el hongo *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*. Se trata de una de las amenazas, de extensión internacional, más graves de las plataneras y causante de cuantiosas pérdidas económicas. Este patógeno, que ataca las raíces e invade el sistema vascular de la platanera, impide su normal alimentación y ocasiona una progresiva deshidratación, amarillamiento de la hoja, marchitez y, por fin, la muerte de la planta.

En los últimos cincuenta años el uso en la agricultura de pesticidas para el control de plagas y patógenos ha contribuido, por un lado, a dañar el medio ambiente y, por otro, a un deterioro en la calidad de los productos agrícolas por su contenido en residuos tóxicos.





Cultivar de gran enana. A la izquierda, platanera sana con racimo a punto de cosecha. A la derecha, platanera enferma con mal de Panamá. La enfermedad alcanzó a la planta en una etapa tardía de su desarrollo. Obsérvese el pequeño tamaño del racimo

El planteamiento clásico en la lucha contra las enfermedades de las plantas ha sido el de eliminar o contrarrestar en lo posible al patógeno por medio de dichos pesticidas. De este modo, se ha olvidado que la planta dispone de sus propias defensas. ¿Por qué no estimularlas? Esta posibilidad tan poco explotada ha dado paso, sin embargo, al desarrollo de los denominados inductores de resistencia.

Este tipo de compuestos químicos, por lo general no tóxicos, inducen procesos bioquímicos en la planta que la ayudan a defenderse por sí misma con una mayor intensidad de la que lo haría el vegetal dejado a su albur. Y así, entre otras respuestas habituales de defensa en la planta, tales sustancias instan a las células vegetales a producir una mayor cantidad de antibióticos de defensa (llamados fitoalexinas) y crear barreras físicas que impidan la penetración del patógeno, amén de desarrollar otras estrategias.

En el Instituto de Productos Naturales y Agrobiología de La Laguna, Marino Fernández y el autor del artículo han venido trabajando en este sentido en los últimos años, y como resultado han descubierto las propiedades de una serie de compuestos derivados de la vitamina K_3, inocuos para las personas, los animales, las plantas y el medio ambiente, que en condiciones de campo han demostrado una contrastada eficacia en la lucha contra el mal de Panamá de la platanera. Esta enfermedad no tenía hasta la fecha posibilidades de control químico. Las parcelas pretratadas han aumentado hasta en un 30 por 100 los racimos cosechados respecto a los producidos por las que no han tenido tratamiento.

Se ha comprobado que las plantas pretratadas con estos compuestos biosintetizan mayor cantidad de antibióticos de defensa (fitoalexinas) que las plataneras control cuando se someten a inoculación en las mismas condiciones experimentales. Hay que resaltar que estas sustancias no provocan por sí mismas la síntesis de antibióticos de defensa, sino que lo que hacen, de una manera sutil, es aumentar su concentración en la planta solamente en el lugar y momento preciso en el que ésta sufre el ataque del hongo invasor.

Dado que este tipo de compuestos no actúan directamente contra el patógeno sino a través de la planta, reforzando sus defensas, se han iniciado ya investigaciones con objeto de probar su eficacia en otros sistemas huésped-parásito, habiéndose obtenido resultados muy prometedores en experiencias preliminares.

En contraste con los pesticidas, este tipo de sustancias no contaminantes están llamadas a desempeñar un importante papel en la agricultura en los próximos años. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas, titular de la patente que protege estos inductores de resistencia, ha licenciado los derechos de explotación de la misma a la empresa INPLA, S.A., dedicada a la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para la agricultura.

ANDRÉS BORGES
Instituto de Productos Naturales y Agrobiología. CSIC. La Laguna, Tenerife

Aplicaciones espaciales

Sistema GPS diferencial de navegación por satélite

De forma rigurosa un sistema de navegación puede definirse como aquel que permite determinar la posición del centro de masas de un usuario respecto a un sistema de coordenadas dado.

Desde la más remota antigüedad se han desarrollado distintos sistemas de navegación terrestre, marítima, aérea y, a partir de mediados de este siglo, espacial que resolvían las necesidades especificas de cierto colectivo con niveles de precisión razonables. Pero, a partir de los años setenta, la aparición de los sistemas de navegación por satélite, y en particular del sistema GPS (Global Positioning System) norteamericano y del GLONASS ruso, han supuesto una auténtica revolución en este campo al permitir que cualquier usuario dotado de un receptor pueda determinar su posición con gran precisión y coste de recepción nulo.

En concreto, el sistema GPS consta de tres grandes segmentos, denominados espacial, de control y de usuarios.

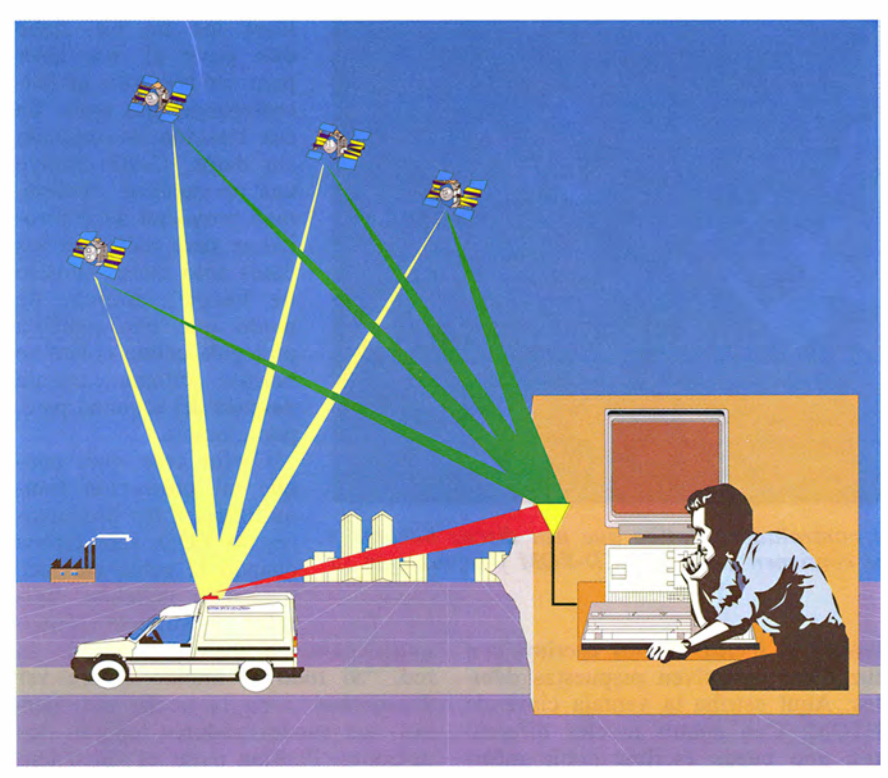
El segmento espacial está constituido por una constelación de satélites cuya configuración nominal es de 21+3, es decir, 21 satélites operativos más 3 de reserva que sirven para sustituir a alguno de los operativos que funcionen mal en cierto instante. Los satélites están situados en seis planos orbitales con una inclinación de 55° respecto al ecuador terrestre y unas longitudes del nodo ascendente de 0°, 60°, 120°, 180°, 240° y 300°. Dentro de cada plano se sitúan cuatro satélites en órbita circular a una altura sobre la Tierra de unos 20.182 kilómetros, por lo que su período es de medio día sidéreo. Los 21 satélites activos de la configuración nominal garantizan que un usuario vea de cuatro a ocho satélites en cualquier lugar del mundo y a cualquier hora del día por encima de cierto ángulo de elevación o máscara (de 10 a 15°).

El segmento de control del sistema norteamericano GPS lo forman una estación maestra de control (Colorado Springs), cinco estaciones de monitorización (Hawai, Ascensión, Diego García, Kwajalein y Colorado Springs), tres antenas de seguimiento (Ascensión, Diego García y Kwajalein) y una red de comunicaciones entre todos los elementos del segmento. Por último, el segmento de usuarios está constituido por todos aquellos utilizadores terrestres, marítimos, aeronáuticos o espaciales, que se hallen interesados en conocer su posición y que, obviamente, dispongan de un receptor adecuado.

El principio físico-matemático en que se basa la navegación por satélite es muy simple. El receptor del usuario recibe las ondas electromagnéticas emitidas por la constelación de satélites y a partir de los tiempos de tránsito de la señal es capaz de calcular la distancia que le separa de cada uno de ellos. Como la posición de los satélites es conocida por el usuario al estar contenida en el mensaje que le llega, éste puede deducir su situación actual así como el error cometido por el reloj que lleva incorporado mediante triangulación a cuatro satélites.

Entre las ventajas del sistema de navegación GPS es posible citar: libre acceso a las señales, niveles de precisión altos y estabilidad temporal de los mismos, cobertura mundial, disponibilidad en todo instante, bajo coste de los equipos de usuario y pasividad del proceso de recepción. El inconveniente más destacado consiste en que, salvo los receptores, el sistema completo es propiedad del Departamento de Defensa norteamericano, quien por ahora se ha comprometido a mantener un modo de funcionamiento para la comunidad civil con un nivel de precisión en el plano horizontal de *100 metros*. Para sus aplicaciones militares, el Departamento estadounidense de Defensa se reserva otro modo que proporciona precisiones más elevadas (unos 20 metros).

Con objeto de mejorar aún más las magníficas prestaciones civiles del GPS en un área geográfica determi-



Sistema localizador de vehículos: mediante el concepto GPS Diferencial es posible gestionar cómoda y eficientemente cualquier flota de vehículos civiles o militares

nada y de eliminar en parte los errores intencionados introducidos por el Departamento de Defensa, se desarrolló el concepto GPS Diferencial (DGPS). Respecto al GPS convencional presenta una novedad: la utilización de una estación fija en tierra (estación diferencial), que también recibe las señales de los satélites y cuya posición se conoce con gran precisión.

La estación compara su situación real con la obtenida a partir de las medidas efectuadas y retransmite la diferencia (errores fundamentales cometidos por el sistema) a los usuarios situados como máximo a unos 200 kilómetros de ella. Un usuario puede mejorar la determinación de su posición hasta conseguir precisiones del *orden de 1 metro*, combinando hábilmente las señales recibidas de los satélites y las correcciones retransmitidas desde la estación.

Las aplicaciones de la navegación por satélite son numerosas y están transformando las técnicas basadas en un conocimiento preciso de la posición, tanto en el mundo civil como en el militar. A título de ejemplo se resumen los principios básicos de dos sistemas DGPS desarrollados por la compañía GMV y actualmente operativos.

El Sistema Avanzado de Navegación Aeronáutica, desarrollado para el ente público AENA, permite a un avión aproximaciones y aterrizajes con visibilidad prácticamente nula. La información recibida desde los satélites y desde una estación diferencial situada en el aeropuerto de destino permite conocer las desviaciones respecto a una senda de vuelo especificada. Estas desviaciones alimentan los instrumentos de vuelo convencionales de cabina y permiten al piloto guiar el avión.

Y el segundo consiste en un Sistema Localizador de Vehículos. El sistema completo consta de dos elementos conectados entre sí vía radio: un equipo móvil instalado en cualquier vehículo terrestre y una central de gestión y presentación donde está ubicada la estación diferencial. La situación del vehículo en tiempo real se presenta sobre un plano (callejero, mapa de carreteras, teatro de operaciones en un conflicto militar, etc.) dibujado en la pantalla del ordenador situado en la sede central. El explotador del sistema puede manejar cómoda y eficientemente una flota de vehículos civiles (transporte de mercancías, autobuses, ambulancias, bomberos, policía, etc.) o militares (carros de combate, unidades de infantería, etc.) ya que, por ejemplo, conoce el vehículo disponible más próximo a un punto seleccionado o la ruta idónea para llegar a cierto destino.

El coche tipo James Bond, dotado de una pantalla en la que por arte de magia puntos luminosos intermitentes señalan su situación sobre un plano, es ya una realidad y no pertenece más al reino de la ciencia-ficción.

JUAN JOSÉ MARTÍNEZ GARCÍA,
Presidente de GMV y Catedrático de la ETSI Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid

MIGUEL ANGEL GÓMEZ TIERNO,
Consultor de GMV y Profesor Titular de la ETSI Aeronáuticos, Madrid

Más allá del binario

Nueva técnica óptica

No olvide de estar atento a los estantes de su abastecedor local de suministros electrónicos. Muy pronto puede hallar alguno nuevo en las estanterías: en vez de cintas, películas en videodiscos digitales (VDD) del tamaño del CD. Dos facciones de compañías electrónicas andan todavía batallando sobre la forma definitiva de los discos, pero están de acuerdo en un punto: los VDD ofrecerán sólo material ya grabado. Las personas que deseen grabar su programa favorito de cocina o crear su propia obra maestra de multimedios, no están de suerte.

Una nueva técnica de almacenamiento de datos, cuya pionera ha sido Optex Communications de Rockville, Maryland, podría cambiar el panorama. Optex está condensando varios años de trabajo en una controladora (grabadora-lectora) que registrará 5,2 gigabytes de datos —ocho veces la capacidad de un CD-ROM y suficiente para varias horas de vídeo comprimido— en un cartucho con disco borrable de 5,25 pulgadas. La capacidad no es nada del otro mundo; pronto la igualarán las lectoras magneto-ópticas. Sí lo es una esperanza: las lectoras de Optex serán baratas y rápidas.

"Podemos fabricar los discos por menos de 1200 pesetas", afirma Brian L. Williams, antiguo ejecutivo de Bell Atlantic que está ahora en Optex. Por mor de comparación, un disco magnético de capacidad equivalente se va a los 240.000 pesetas. También se gana en velocidad. "Las técnicas de registro óptico al uso alcanzan su capacidad límite en los 40 megabits por segundo", dice Donald B. Carlin, científico de la empresa. "Nosotros empezamos a 50 —casi tan rápido como los actuales discos duros mag-

néticos— y podemos llegar a los 120. Estamos alumbrando un planeta nuevo".

Tales velocidades de grabación son posibles porque el dispositivo de Optex, torpemente denominado disco con memoria óptica de aprisionamiento de electrones (ETOM), introduce dos innovaciones en el almacenamiento óptico. El primero es el material, que reacciona a la luz, no al calor. Para fabricar sus discos, la empresa emplea una técnica de conformación de una fina película de sulfuro de un metal, impurificado con dos elementos de tierras raras (europio y samario) sobre una placa de vidrio a alta temperatura. Este material "puede ser indecentemente barato", dice Gerard A. Alphonse, experto en óptica del Centro de Investigación David Sarnoff de Princeton.



Prototipo de controladora óptica que usa discos baratos y borrables que contienen hasta seis CD-ROM y septuplican su velocidad

La controladora ETOM emplea dos láseres de colores distintos. En el primer prototipo son de gas rojo y azul, que pueden comprimir hasta 10 gigabytes en un disco. El producto para el consumidor, que se pondrá a prueba el año que viene, los sustituirá por diodos láser rojo e infrarrojo, más baratos.

Para grabar datos, se ilumina un micrometro cúbico de disco con un destello muy breve de luz azul, que excita los electrones del europio. Dotados de mayor energía, éstos saltan a un ion próximo de samario. Algunos electrones fallan y vuelven a caer a su estado fundamental de energía, emitiendo un destello rojo-anaranjado, que confirma la recepción de los datos. La mayoría, sin embargo, quedan aprisionados en los iones de samario. Allí permanecerán durante meses, probablemente años, incluso a temperaturas de 150 grados Celsius. Pero si se ilumina el punto con un láser rojo, los electrones aprisionados tornan a su posición de partida, emitiendo un destello de luz anaranjada al caer. Al leer ese destello, se recuperan los datos.

Los datos pueden constar de más de un bit: una segunda innovación. Los CD y sus sucesores almacenan la información en forma binaria: una señal está allí (1) o no está (0). ETOM introduce matices de gris entre esos extremos. Escriba en un punto con luz brillante, y muchos electrones darán el salto, de modo que el disco devuelve destellos brillantes al leerlo. Puntos escritos con luz débil devuelven respuestas débiles. Aquí estriba la ventaja clave de ETOM. Con cuatro niveles diferentes, uno puede escribir doble información digital en un disco y leerla dos veces más deprisa; con ocho niveles, tres veces más datos en un tercio del tiempo. Los científicos de Optex han presentado registros de 13 niveles en sus materiales. Sus discos iniciales emplearán seis niveles, almacenando 2,5 bits en cada punto.

El año pasado, los científicos de la compañía Optex descubrieron una nueva variedad de material ETOM que responde a los mismos láseres infrarrojos usados en las lectoras de disco de los CD-ROM y en las futuras VDD. Este poquito de suerte ayudará a evitar uno de los mayores obstáculos que ha de afrontar un nuevo medio: la compatibilidad con técnicas precedentes. La compañía ha ensayado ya un prototipo que podía emplear discos ETOM y discos magneto-ópticos. Las controladoras para el consumo, promete Carlin, registrarán sobre discos ETOM, pero podrán también leer CD-ROM y VDD.

Pero ocurre que un problema suele llamar a otro. La capacidad de hacer perfectas copias de discos grabados obligó a Hollywood a cercenar nuevas técnicas apenas nacidas: recuérdese la cinta digital de audio. No es por casualidad por lo que Optex reclamó los servicios de Raleigh Coffin —antiguo presidente de CBS/Fox Video, el mayor distribuidor mundial de vídeos domésticos— para su jefatura de relaciones públicas.

Como la lectura de un punto de un disco ETOM libera los electrones de sus prisiones, también borra los datos allí cifrados. A medida que el láser lee un bit, debe éste pasar al otro láser para ser reescrito un microsegundo más tarde. En esa fracción de segundo sin datos, Coffin intuye una oportunidad. "Podríamos proyectar la controladora para recuperar los datos sólo cierto número de veces", indica, de modo que una película protegida contra copias se borrase automáticamente después del segundo pase, por ejemplo.

Coffin cree que, aunque tal protección tranquilizaría a los productores de VDD, será crítica cuando la gente empiece a alquilar películas digitales y soporte lógico multivalente a los servicios de la red. "Si todo el mundo quiere ver *Terminator 2* en la noche del viernes, los suministradores tendrán dos opciones. Podrían pasar el vídeo lentamente mediante millones de llamadas telefónicas de dos horas. O podrían descargar la película completa en menos de 90 segundos pasándola a un disco grande y rápido como el ETOM, si es que pueden fiarse de que se evaporará antes de que los piratas empiecen las copias ilegales."

W. WAYT GIBBS

La pista del dinero

Mercado de valores cibernético

El ciberespacio, observó el cibermagnate John Perry Barlow, es donde va el dinero cuando no está en el bolsillo de alguien. Los financieros comienzan, sin embargo, a rastrearle la pista. En la británica Cambridge se está constituyendo el primer mercado de valores de Internet. La empresa, Electronic Share Information Ltd. (ESI), ilustra con nitidez los problemas y las posibilidades de un mercado de nuevo cuño, así como su impacto en la economía a mayor escala.

En una predicción convertida ahora en aforismo clásico, Tom Malone, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sostenía que la técnica de la información fragmentaría las macrocompañías; sacaría el trabajo de los núcleos jerárquicos de las corporaciones para entregárselo a los mercados electrónicos. Con el abaratamiento de la información, aducía Malone, los ordenadores facilitarían

la prospección y búsqueda de los mejores proveedores. Una prospección más exhaustiva significaría, a su vez, menos trabajo para filiales remotas de corporaciones mastodónticas; se operaría una transformación radical hacia la instauración de empresas pequeñas y medianas.

No le faltan ejemplos a la tesis de Malone. Hacia mediados de los años setenta, tras siglos de crecimiento de las empresas, el tamaño de las mismas comenzó a disminuir en las naciones industrializadas. Erik Brynjolfsson, alumno aventajado de Malone, halló una correlación entre inversión en técnica de la información y contracción del tamaño de la empresa.

Triunfe o fracase, la arriesgada iniciativa de ESI de crear mercados de valores en sectores de la economía donde nadie había especulado antes aportará un ejemplo a estudiar de los principios subyacentes bajo la nueva tendencia.

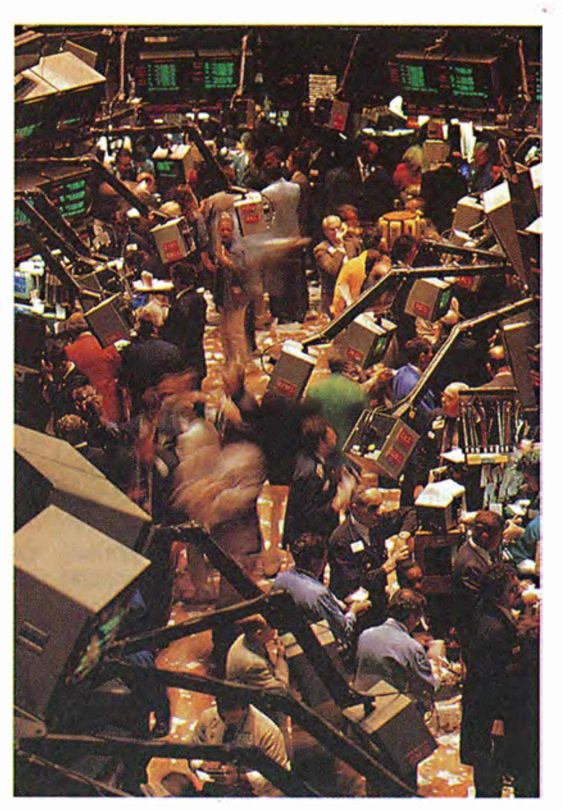
En el corazón del empeño de ESI yace una observación elemental: los corredores de bolsa no son más que una forma muy cara de terminal de ordenador. La mayoría de las tareas rutinarias de los corredores —formalizar órdenes de compra o venta y enviar información financiera— se materializan tecleando en el ordenador las instrucciones recibidas del cliente. Pero, conforme las redes se van extendiendo cada vez más, los clientes preferirán pulsar ellos directamente las órdenes.

Como primer paso, ESI sustituyó agentes por ordenadores. Y así, ofrece análisis financieros y abre a los clientes la posibilidad de comprar y vender, electrónicamente, acciones en mercados existentes. Pero hay más, por supuesto. El interés del proyecto de ESI radica en las posibilidades de esa técnica: no sólo abarata la negociación de las acciones disponibles, sino que, además, crea una forma única de mercado de valores, forma que permitie vender acciones de compañías que, si así no fuera, jamás aparecerían en el parquet.

Si se presta crédito a la historia tal como la cuenta Jack Lang, director técnico de ESI, la idea de establecer una bolsa de valores de nuevo cuño surgió por mera casualidad. Con un millar de empresas pequeñas y medianas de alta tecnología, Cambridge es un remedo europeo del californiano Valle del Silicio. Los empresarios del lugar afirman que habría muchas más si contaran con capital dispuesto a correr el riesgo. Cuando ESI comenzó a pergeñarse, alguien trajo a colación el símil de la agencia matrimonial: ofrecer información financiera sobre pequeñas empresas que buscaban capital. Alguien apostilló, siguiendo la metáfora, que casar a los inversores con las empresas es precisamente lo que hace la bolsa. La analogía no se agotó ahí; las ideas comenzaron a bullir.

Supongamos, expone Lang, que ESI puede operar a una décima parte del coste de la Bolsa de Londres. Nuestra empresa podría entonces competir con los bancos y capitalistas inversores aportando recursos financieros a firmas pequeñas y medianas. La cantidad mínima que una compañía podría obtener en el mercado, teniendo en cuenta los costes de la transacción de acciones, oscila entre 10 y un millones de libras. Dado que los costes del mercado son sólo de unas pocas libras, Lang postula que los inversores desearán comprar acciones por valor de unos centenares de libras en lugar de unos miles. El propio medio que transmite las órdenes de compra y venta de los inversores sirve para presentar información acerca de la situación de las empresas.

El marco legal imperante es lo que le produce a ESI algún que otro quebradero de cabeza. Esta bolsa volante habrá de convencer a la Oficina Británica de Fianzas e Inversiones —el mismo organismo que regula la Bolsa de Londres— de que ESI es una empresa honrada y solvente. Como el mercado estará en Internet y a él podrá accederse desde fuera de las islas, tendrá también que convencer a los organismos reguladores extranjeros, y en particular a la Comisión Norteamericana de Fianzas y Divisas, de que está haciendo ni más ni menos que lo que haría cualquier atildado corredor británico al recibir una llamada telefónica de un cliente norteamericano.



Los agentes de cambio y bolsa y los analistas podrían convertirse en dinosaurios vestidos de chaqué

La mayor amenaza reside en los tentadores inversores potenciales. Para comprender esta amenaza —y las repercusiones potenciales si ESI y su laya triunfan— detengámonos un momento a considerar la teoría económica subyacente bajo las predicciones de Malone.

Siguiendo los pasos del premio Nobel Ronald H. Coase, los economistas calculan que el tamaño de una empresa viene determinado por el punto de equilibrio entre lo que cuesta obtener recursos —dinero, equipo, materias primas— de los mercados exteriores y lo que sobrecuesta crearlos en casa. Cuanto más caras sean las transacciones, tanto mayores serán los recursos que las firmas consideren deseables acopiar por sí mismas y, por consiguiente, tanto más grandes serán.

Las técnicas de información facilitan la obtención de los datos necesarios para comparar productos. Lo que no suele hacer, sin embargo, es traducir los datos de pantalla en conocimiento necesario para tomar una decisión. En último término, la economía del saber será lo que dé forma a las empresas, algo que se está comprobando no tiene por qué coincidir con la economía de la información.

ESI proveerá así un interesante experimento. Su técnica puede hacer circular información a un coste de una fracción del que vale en los mercados tradicionales de valores. Pero ese atributo no quiere decir que los inversores alcancen el conocimiento necesario para sopesar el riesgo y el beneficio. Pero si están capacitados, entonces muchos intermediarios financieros se convertirán en dinosaurios vestidos de chaqué.

JOHN BROWNING

Taller y laboratorio

Alun L. Lloyd

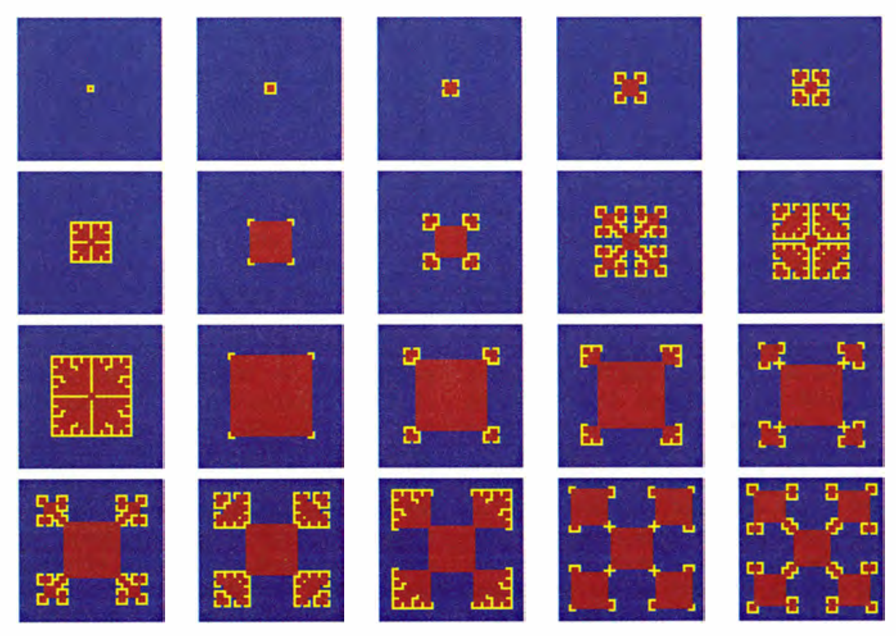
Cómputo de rondas del dilema del preso

Las dos formas principales en que los miembros de una sociedad pueden interactuar, buscando su beneficio personal, son la cooperación y la explotación. Tratando de comprender más profundamente la dinámica social de individuos en competencia, los investigadores han formalizado dichas opciones encajándolas en una estructura conceptual denominada teoría de juegos.

Describo un escenario geométrico, en el cual los jugadores habitan en los cuadros de una especie de tablero de ajedrez de grandes dimensiones y se dedican a jugar con sus vecinos una partida tras otra del "dilema del preso". Para simplificar la programación he prescindido de los rincones y los bordes del tablero, considerando en cambio que los escaques se curvan y envuelven hacia atrás sobre sí mismos. Todas las partidas de cada ronda se juegan al mismo tiempo.

En cada ronda, cada jugador ha de vérselas, de uno en uno, con sus ocho vecinos inmediatos y también consigo mismo (la autointeracción tiene la función de simplificar el programa). Los jugadores van ganando puntos de acuerdo con la estrategia que apliquen ellos y sus vecinos. Cada jugador obtiene un punto si ambos cooperan; ninguno, si ambos tratan de engañar al otro. El jugador no recibe nada si coopera y su oponente engaña. La puntuación máxima, que he denotado b, es para el traidor (el jugador que defrauda mientras que el otro coopera). El valor de b será en definitiva el que controle el resultado del juego. Basta tomar un valor mayor que 1; yo he utilizado 1,85. Una tabla denominada matriz de pagos resume las puntuaciones; en ella se enumeran las recompensas de las cuatro posibles combinaciones de estrategias.

Los nueve pagos resultantes de la partida se suman y constituyen el tanteo de cada jugador en esa ronda. Seguidamente, cada jugador mira si alguno de sus ocho vecinos consiguió en esa ronda una puntuación mayor que la suya. De ser así, adoptará en la ronda siguiente la estrategia que más éxito tuvo. Por ejemplo, si lo que hizo el rival de máxima puntuación fue cooperar, en la ronda siguiente el jugador cooperará.



Los explotadores (en rojo y en amarillo) *van gradualmente invadiendo un mundo de cooperadores* (azul). *El juego empezó con un explotador en el centro, con un pago de traición ajustado en 1,85*

Si el juego consiste en una sola partida, sólo contra otro jugador, lo mejor es la defección. La traición hace máxima nuestra puntuación con independencia de lo que haga nuestro oponente. Sin embargo, en el juego geométrico, el resultado es más difícil de pronosticar porque la estrategia que adopta cada jugador en la ronda siguiente depende no sólo de la suya, sino también de las puntuaciones de sus ocho vecinos. A su vez, la puntuación de cada vecino depende de la de sus vecinos inmediatos, lo que entraña que las puntuaciones de los 24 jugadores más próximos afecten al resultado en cada casilla del tablero.

He escrito el programa en un dialecto del lenguaje BASIC, llamado QBASIC, que viene con las versiones recientes de MS-DOS para ordenadores compatibles PC. El programa funciona con el QuickBASIC de Microsoft tanto en PC como en Macintosh y puede traducirse a otros lenguajes de alto nivel.

Una vez que el programa funciona, se pueden ajustar diversos parámetros para modificar los resultados. Como he mencionado ya, el juego depende mucho del valor de b, que es la ganancia correspondiente a la "puñalada por la espalda". Conforme aumente b, mejor librados salen los traidores en sus encuentros con cooperadores. Cuando un cooperador solitario está cercado por explotadores, siempre es el cooperador quien resulta malparado. Pero los grupos de cooperadores pueden ayudarse unos a otros a prosperar. Tenemos un ejemplo en un cuadrado de cooperadores rodeado por un mar de traidores. Cada cooperador logrará cuatro puntos (uno al jugar con cada uno de sus tres vecinos, más uno al jugar consigo mismo), mientras que los traidores vecinos puntuarán como máximo $2b$ porque tienen, a lo sumo, a dos cooperadores contiguos. Si b no es de-

masiado grande, los cooperadores puntuarán más que los traidores. Los traidores solitarios, sin embargo, también salen bien librados, porque están rodeados de cooperadores.

A resultas de la competición entre tales diferentes circunstancias vamos viendo cómo los núcleos de cooperadores y de explotadores se engruesan y se contraen, cómo chocan unos con otros y luego se rompen y separan. No es raro que llegue a producirse un equilibrio dinámico. Vista a distancia, resulta discernible una pauta general, mientras las casillas van cambiando sin cesar.

Dado que el pago de cada casilla es un cierto múltiplo de b más cierto múltiplo de 1, hay solamente un conjunto de valores de b para los cuales cambia el comportamiento. El primer experimento que podríamos realizar consistiría en hacer funcionar el programa para diferentes valores de b, comprendidos entre 1 y 3. Probaremos, por ejemplo, 1,15, 1,35, 1,77, 1,9 y 2,01. Para pequeños valores de b, los explotadores tienden a quedar aislados, mientras que para valores altos forman estructuras conexas.

Una vez observados algunos de los distintos comportamientos, es posible que queramos describirlos en términos más cuantitativos. Contemos el número de cooperadores y de explotadores de cada ronda (identificados por un total de cuatro colores, dependiendo de las estrategias aplicadas en dos rondas). ¿De qué forma varían estas cantidades al ir desarrollándose la competición? Para algunos valores de b, estas frecuencias se van aproximando progresivamente hacia cierto valor fijo; para otros, varían de forma periódica (por ejemplo, tomando uno de dos valores, dependiendo de que la ronda sea par

Las ideas de cooperación y defección en BASIC

Para sacar máximo provecho de los juegos de "dilema del preso" es preciso comprender la construcción del programa. El programa lleva el control de los jugadores y de sus puntuaciones organizándolos en matrices.

Cada casilla del tablero se designa con sus números de fila y columna, que forman un par ordenado *(i, j)*. He optado por tomar igual a 60 el número *N* de casillas del tablero. Las estrategias son designadas mediante números: 1 para la cooperación y 2 para la defección. Las estrategias adoptadas por cada jugador pueden entonces quedar registradas mediante una matriz numérica *e(i, j)*. Los pagos quedan registrados en otra matriz, *mp(x, y)* —*mp* significa matriz de pagos— siendo *x* la estrategia que adopta uno de los jugadores e *y* la de su oponente. Por lo tanto, un jugador que adopte la estrategia de defección (2) contra un adversario cooperador (1) recibirá *mp(2, 1)* que es igual a *b*, el pago de la traición.

El programa, antes de empezar el juego, decide qué estrategia utilizará cada jugador en la primera ronda. Para cada cuadrado, el ordenador elige al azar un número entre 0 y 1. Si el número es menor que cierto valor (por ejemplo, 0,1), el programa sitúa en esa casilla a un explotador; si no, coloca a un cooperador. El valor de corte indica aproximadamente qué proporción de jugadores harán trampa en la primera ronda.

El programa va examinando cada uno de los cuadrados *(i, j)* del tablero, calculando el pago de cada jugador y registrándolo como pago *(i, j)*. El pago se determina sumando las puntuaciones de las partidas con los nueve jugadores, cuyas posiciones relativas al jugador situado en *(i, j)* están dadas por *(i + k, j + l)*, tomando *k* y *l* los valores –1, 0 o 1.

Fijémonos que en el programa hay una ligera complicación, porque el tablero se arrolla sobre sí mismo. Si *j* es igual a 1, estamos mirando la primera columna, pero sus vecinos "de la izquierda" están, en realidad, en la última. La última columna y la primera y la última filas padecen problemas similares. Para resolverlos, introduje una tabla, *cdc(m)*, de "condiciones de contorno", que dirige al ordenador en tales casos.

Ahora que conocemos la posición *(i, j)* y de cada uno de sus vecinos *(cdc(i + k), cdc(j + l))*, la matriz *e(i, j)* indica las estrategias que va a jugar cada uno. El pago de esta única partida puede calcularse consultando la tabla que contiene a la matriz de pagos: *mp(e(i, j), e(cdc(i + k), cdc(j + l)))*. Antes de pasar a la siguiente casilla del tablero, se suman nueve de estos pagos.

Una vez que ha sido calculado el pago correspondiente a cada casilla, el programa halla la estrategia de mayor éxito en cada vecindario. Seguidamente actualiza la tabla de estrategias en función de los resultados, almacenando estas nuevas estrategias en la tabla *ne(i, j)*. El programa va revisando cada casilla, registrando su pago en la variable *pm*, "pago máximo", y su estrategia en *ne(i, j)*. El programa examina por turno las cuadrículas vecinas. Si alguno de los pagos de las vecinas es mayor que *pm*, *pm* recibe tal valor, y la estrategia de esa vecina se guarda en *ne(i, j)*. Examinados todos los vecinos, la variable *pm* contiene el valor más alto del pago en el entorno, y *ne(i, j)* contiene la estrategia seguida por dicho jugador.

Una vez decididas todas las nuevas estrategias *ne(i, j)*, se procede a copiarlas en la matriz *ne(i, j)* y comienza la ronda siguiente. Para seguir el desarrollo del juego, se colorea en la pantalla una plantilla cuadriculada de puntos. La coloración depende de la estrategia que haya adoptado cada jugador en la ronda actual y en la anterior. Hay, por tanto, cuatro colores: azul (está cooperando, ha cooperado), rojo (está traicionando, ha traicionado), verde (está cooperando, ha traicionado) y amarillo (está traicionando, ha cooperado). Merced a este sistema, no sólo podemos ver qué jugadores son los cooperadores (azul y verde), sino también quiénes están cambiando (verde y amarillo) y quiénes no están cambiando (rojo y azul). En el programa, la matriz *c(x, y)* indica al ordenador qué colores representan las estrategias anterior y actual (*x*, e *y*, respectivamente).

Si el programa va demasiado lento, conviene reducir el tamaño del tablero. Al duplicar el número de cuadros, el programa tardará aproximadamente unas cuatro veces más en jugar cada ronda. Si se desea aumentar el tamaño del tablero, puede ser necesario aumentar adecuadamente las dimensiones de las tablas *e*, *en* y *cdc*.

ESTRATEGIA DEL JUGADOR	ESTRATEGIA DEL ADVERSARIO: COOPERACION	ESTRATEGIA DEL ADVERSARIO: DEFECCION
COOPERACION	1	0
DEFECCION	*b*	0

La matriz de pagos

Programa para el "dilema del preso"

```
DEFINT C, I–N, S                       definición de las variables y de la
DEFSNG B, H, P                         dimensión de las matrices
DIM e(120, 120), ne(120, 120)
DIM cdc(121), c(2,2)
DIM pago(120, 120)

LET b = 1.85                           ganancia por la defección
LET N = 60                             tamaño del tablero
LET p = 0.1                            proporción de explotadores
LET mp(1, 1) = 1                       matriz de pagos
LET mp(1, 2) = 0
LET mp(2, 1) = b
LET mp(2, 2) = 0
                                       asignación de colores
LET c(1, 1) = 1                        = 409 en un Mac
LET c(2, 2) = 4                        = 205 en un Mac
LET c(1, 2) = 2                        = 341 en un Mac
LET c(2, 1) = 14                       = 69 en un Mac

RANDOMIZE TIMER                        inicialización del tablero
FOR i = 1 TO N
  FOR j = 1 TO N
    LET e(i, j) = 1
    IF (RND < p) THEN LET e(i, j) = 2
NEXT j, i

FOR i = 1 TO N                         condiciones de contorno
  LET cdc(i) = i                       sin dificultad si i está entre 1 y N
NEXT i
LET cdc(0) = N                         redirección de vecinos de los bordes
LET cdc(N + 1) = 1

SCREEN 12                              innecesaria en Mac

FOR M = 1 TO 1000                      empieza el juego

  FOR i = 1 TO N                       cálculo de los pagos de cada jugador
    FOR j = 1 TO N
      LET pa = 0
      FOR k = –1 TO 1
        FOR l = –1 TO 1
          LET pa = pa + mp(e(i, j), e(cdc(i + k), cdc(j + l)))
      NEXT l , k
      LET pago(i, j) = pa
  NEXT j , i

FOR i = 1 TO N                         determinación del pago máximo en
  FOR j = 1 TO N                       cada vecindad y cálculo de
    LET pm = pago(i, j)                nuevas estrategias
    LET ne(i, j) = e(i, j)
      FOR k = –1 TO 1
        FOR l = –1 TO 1
          IF pago(cdc(i + k), cdc(j + l)) > pm THEN
            LET pm = pago(cdc(i + k), cdc(j + l))
            LET ne(i, j) = e(cdc(i + k), cdc(j + l))
          END IF
        NEXT l, k
  NEXT j, i

  FOR i = 1 TO N                       presentación de las estrategias
    FOR j = 1 TO N
      COLOR (c(ne(i, j), e(i, j)))     ForeColor en Mac
      PSET(i, j)
      LET e(i, j) = ne(i, j)
    NEXT j, i
NEXT M

END
```

o impar) o incluso de manera impredictible. Calculemos el tanto por ciento de jugadores que cambian de estrategia en cada ronda. Si es igual a 0, se ha alcanzado un equilibrio estático. Gráficamente, la situación se manifiesta porque sólo hay casillas de dos colores. (Esta configuración se presenta cuando $b = 2{,}01$.)

¿Dependen los resultados de la proporción inicial de cooperadores y de explotadores? Pruebe a hacer funcionar varias veces el programa con diferentes proporciones. También es crucial el grado de apiñamiento de los cooperadores y los explotadores. Aunque el número de cooperadores sea pequeño, en ciertas ocasiones pueden agruparse y prosperar. En otras, quedarán aislados y por consiguiente condenados a desaparecer.

Este programa puede generar configuraciones curiosas si la disposición inicial es simétrica. Resulta sencillo modificar el programa para que inicialmente cada casilla corresponda a un cooperador. Elimínese la línea del programa que decide si una casilla debe inicialmente corresponder a un cooperador o a un explotador. Hagamos ahora que una sola casilla, cerca del centro, empiece siendo explotadora. (Por ejemplo, insértese la línea $e(30, 30) = 2$, justo después del bucle que en este caso determina que todas las casillas sean cooperadores.) Tomemos un valor de b comprendido entre 1,8 y 2, y pongamos en marcha el programa. Podrá verse cómo el único explotador invade el mundo de cooperadores [*véase la figura 1*].

Otra modificación sencilla consiste en desarrollar el juego sólo con los ocho vecinos. Para ello basta con no sumar el pago de la casilla al jugar contra sí misma (o sea, cuando $k = 0$ y $l = 0$ en el programa). Se observarán conductas similares, aunque con valores de b ligeramente diferentes.

O tal vez se quieran ensayar condiciones de contorno. Por ejemplo, "desenrollemos" el tablero y hagamos que los jugadores del borde compitan con sus cinco vecinos y que los de las esquinas lo hagan sólo con los tres suyos. Este supuesto puede resultar más engorroso de programar, dado que las casillas del centro, de los lados y de los vértices han de ser tratadas de distinto modo. Otra variante consistiría en imponer que todas las casillas de los vértices y de los lados cooperen siempre o traicionen siempre. Un cambio interesante estribaría en desarrollar el juego con solamente los cuatro vecinos más próximos (por arriba, abajo, derecha e izquierda).

Juegos matemáticos

Klaus Burde

Numeración fraccionaria

Cinco náufragos, en una isla desierta, han recogido un montón de cocos. Pero antes de poder repartírselos sobreviene la noche y optan por acostarse a descansar.

La luz de la Luna, de madrugada, despierta a uno de ellos. Desconfiando de sus compañeros, decide, por si acaso, hacerse con su parte. Reparte equitativamente los cocos en cinco montones. Al hacerlo, sobra uno, que arroja lejos. Vuelve a agrupar cuatro de los montones en uno solo, se lleva el quinto montón junto a su yacija y ya tranquilo, vuelve a dormirse.

Un segundo náufrago se despierta un poco más tarde. Se dirige hasta el montón colectivo y se sirve, procediendo como el primero. También ahora sobra un coco, que tira lejos. Los otros tres compañeros actúan de igual manera: cada uno se apodera de una quinta parte del montón, que empequeñece tras cada operación, sobrando siempre, tras cada reparto, un coco suplementario.

¿Es posible semejante historia? En caso afirmativo, ¿cuántos cocos habían recogido inicialmente los náufragos?

Existe una infinidad de soluciones, pero no tema por eso. Vamos a describir un procedimiento sistemático para hallarlas todas, y, de esa forma, resolveremos el problema y todos los problemas similares.

El método, que se basa en una sorprendente posibilidad de representación de los números naturales, nos interesa más que una solución propiamente dicha: vamos a utilizar como base de numeración, no la base 10, en que se funda la escritura decimal corriente, ni la base 2, con la que computan los ordenadores, sino una cantidad fraccionaria, en nuestro caso, la base 5/4.

Cocos generalizados

Como tantas veces ocurre en matemáticas, resulta útil examinar el problema desde una perspectiva más general: r náufragos recogen un número n_0 de cocos, y van después, por turno, retirando cada uno su parte; n_1 es el número de cocos restantes después del primer reparto, n_2, los que aún quedan después del segundo, y así sucesivamente. El número n_j de cocos restantes tras la j-ésima partición disminuye a medida que j aumenta.

Antes de la j-ésima división, el náufrago de turno dispone de n_{j-1} cocos. Procede a distribuirlos en r montones iguales y arroja lejos los a_{j-1} cocos sobrantes. Se apropia de h montones de entre los r. En nuestro ejemplo, h es igual a 1, pero puede tomar todos los valores de 1 a $r-1$. Reagrupa lo que queda de sus $s = r - h$ montones, formando un nuevo montón de n_j cocos, hecho que se expresa por la fórmula:

$$n_j = s(n_{j-1} - a_{j-1})/r$$

o bien, en función de n_{j-1}, por:

$$n_{j-1} = a_{j-1} + n_j r/s$$

Supongamos, además, que el proceso de repartición se reitera mientras haya cocos disponibles. Puede ocurrir entonces que los náufragos se sirvan más de una vez. En un momento dado, el número n_k de cocos que le quedan al siguiente será inferior a r. Cuando así suceda, $a_k = n_k$ y $n_{k+1} = 0$; a partir de este valor, el reparto ya no es posible.

Las fórmulas de reparto se expresan de una segunda forma para los distintos valores de j:

$$n_0 = a_0 + n_1 r/s$$

$$n_1 = a_1 + n_2 r/s$$

$$n_2 = a_2 + n_3 r/s$$

y así sucesivamente. Introduciendo la segunda fórmula en la primera se obtiene:

$$n_0 = a_0 + r(a_1 + n_2 r/s)/s$$
$$= a_0 + a_1 r/s + (r/s)^2 n_2$$

Podemos reemplazar n_2 por su expresión, lo cual da:

$$n_0 = a_0 + a_1 r/s + (r/s)^2(a_2 + n_3 r/s)$$
$$= a_0 + a_1(r/s) + a_2(r/s)^2 + a_3(r/s)^3.$$

Este proceso de sustitución se repite hasta que n_{k+1} sea igual a 0:

$$n_0 = a_k(r/s)^k + a_{k-1}(r/s)^{k-1} + \ldots$$
$$+ a(r/s) + a_0.$$

Tenemos así una representación de



1. En una isla desierta, cinco náufragos se reparten, por turno y a escondidas, un montón de cocos

¿Cómo se expresa el 17 en base 3/2?

Escribamos la primera fórmula de reparto en la forma: $n_1 = 2(17 - a_0)/3$, donde a_0 ha de ser necesariamente 0, 1 o 2. Como n_1 ha de ser un número entero, $(17 - a_0)$ ha de ser divisible por 3. Se deduce que $a_0 = 2$, por ser a_0 el resto de la división de $n_0 = 17$ entre 3.

Al sustituir $a_0 = 2$ en la fórmula mencionada arriba, se obtiene $n_1 = (2/3) \times 15 = 10$. Para la segunda fórmula de repartición, n_2 es igual a $2(10 - a_1)/3$, con $a_1 = 1$, siendo a_1 el resto de la división de 10 entre 3.

Esta descomposición da:

17/3 = 5 con resto igual a 2; así pues, $a_0 = 2$,

$n_1 = (2/3) \times (17 - 2) = 10$

10/3 = 3 con resto igual a 1; así pues, $a_1 = 1$,

$n_2 = (2/3) \times (10 - 1) = 6$

6/3 = 2 con resto 0; así pues $a_2 = 0$,

$n_3 = (2/3) \times (6 - 0) = 4$

4/3 = 1 con resto 1; así pues, $a_3 = 1$,

$n_4 = (2/3) \times (4 - 1) = 2$

2/3 = 0, resto 2; por lo tanto, $a_4 = 2$, $n_5 = (2/3) \times (2 - 2) = 0$

Se deduce que 17 se expresa 21012 en base 3/2, como verificamos a continuación:

$2 \times (3/2)4 + 1 \times (3/2)3 + 1 \times (3/2) + 2 = 17$.

KLAUS BURDE es profesor del Instituto de Algebra y Teoría de Números de la Universidad Técnica de Brunswick.

n_0 en función de las sucesivas potencias de r/s, en la que los coeficientes a_0, a_1, ..., a_k son números comprendidos entre 0 y $r - 1$.

Si en lugar de la base fraccionaria r/s se tomase la base 10, la última de las fórmulas anteriores no sería más que la representación decimal del número natural n_0 de dígitos $a_k a_{k-1} \ldots a_0$ (leídos de izquierda a derecha). Sabemos ya, desde la escuela primaria, que se puede reemplazar el número 10 por un número natural cualquiera mayor que 1.

De la observación precedente se deduce la existencia de representaciones cuando la base r/s es una fracción mayor que 1. Se dice que la fracción es irreducible si r y s son primos entre sí, lo que supondremos en lo sucesivo; existe una sucesión de cifras $a_k a_{k-1} \ldots a_0$ que verifican la ecuación precedente. Escribiremos que $n_0 \sim a_k a_{k-1} \ldots a_0$, omitiendo la base r/s cuando no haya riesgo de confusión. La representación (r/s) se obtiene al resolver hasta el final el problema generalizado de los náufragos.

Los números intermedios n_1, n_2, etc., desempeñan un papel esencial en lo que sigue. Todos son divisibles por s porque el j-ésimo montón, formado por n_j cocos, se obtiene reuniendo s montones de igual tamaño. La representación de n_j en la base n_0 es la de n_0 sin las j últimas cifras:

$$n_j \sim a_k a_{k-1} \ldots a_j$$

porque ésta es exactamente la sucesión de restos resultantes de la ulterior repartición del j-ésimo montón.

Contadores en base 5/4

¿Cómo hacer para contar en base fraccionaria, por ejemplo, en la base 5/4? Se empieza, como siempre, por 1, 2, 3, 4, pero en esta base no existe la cifra 5.

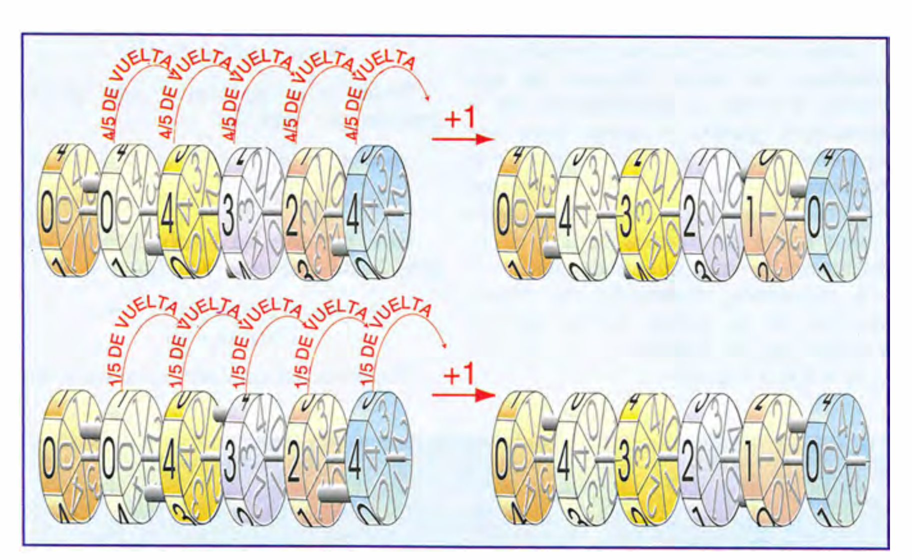
En base 5, el cinco se denota 10 $(1 \times 5^1 + 0)$; y se denota 40 $(4 \times (5/4) + 0)$ en base 5/4. La cuenta continúa 41, 42, 43, 44, y después 430, que corresponde a diez.

El salto de 44 a 430 es menos inquietante de lo que parece. Basta imaginar un cuentakilómetros que exprese el camino recorrido en la base r/s (*véase la figura inferior, a la izquierda*). Un cuentakilómetros normal dispone, para cada cifra decimal, de una ruedecita rotulada con los dígitos 0 a 9. Se cuenta haciendo avanzar la rueda del extremo derecho (rueda de las unidades) por cada unidad adicional.

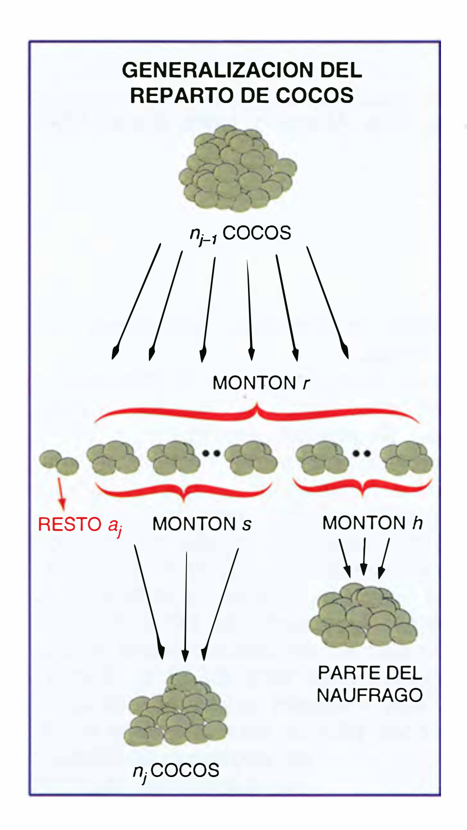
Cuando una rueda, sea la que sea, después de pasar por 9 vuelve al 0, un mecanismo desplaza una unidad la rueda situada a su izquierda: es el arrastre, que cuenta lo que se "lleva". Si el contador indica, por ejemplo, 999, el siguiente avance de la rueda de las unidades desencadena una sucesión de arrastres sobre las ruedas vecinas y la marca final es 1000.

Un contador kilométrico en base 5 estaría compuesto por ruedas que contuvieran cada una las cifras 0 a 4, que se desplazasen una unidad cada vez y volvieran al 0 después de haber alcanzado el 4.

El funcionamiento del contador en base 5/4 es idéntico; ahora bien, la rueda donde se lleva el arrastre ha de avanzar cuatro unidades y no una; al pasar al 0 después de haber alcanzado el 4, la rueda debería indicar 5, pero en realidad señala 0, marcando así cinco unidades de menos. En ese mismo momento, la



2. Un cuentakilómetros en base 5/4. Al cabo de 19 kilómetros indica 004324 (arriba a la izquierda). *Al recorrer un kilómetro más, la rueda exterior derecha se desplaza una unidad e indica 0 en lugar de 4. El mecanismo de arrastre hace avanzar cuatro unidades a la rueda situada a su izquierda: baja de 2 a 1 pasando por 3, 4 y 0. Cuando una rueda pasa por 0 provoca el arrastre de la vecina, y así sucesivamente. El mecanismo se detiene cuando la quinta rueda contada desde la izquierda pasa de 0 a 4; el resultado final* (arriba a la derecha) *es 0421020, es decir, 20 en base 5/4. Se ha representado abajo una forma distinta de numeración del contador que hace que los arrastres provoquen giros de un cuarto de vuelta en la rueda de la izquierda. Dispositivos mecánicos adecuados (no representados) se encargarían de los giros y las retenciones.*



rueda de la izquierda, en lugar de girar un quinto de vuelta, como en el caso del contador en base 5, ha de avanzar cuatro pasos, es decir, 4/5 de vuelta.

Generalicemos el proceso: las ruedas de un cuentakilómetros en base *r/s* contienen los guarismos comprendidos entre 0 y $r-1$ y se desplazan *s* pasos con respecto del arrastre sobre la rueda que se encuentra situada a su izquierda.

Exceptuada la rueda de las unidades, todas las ruedas del contador en base 5/4 van indicando sucesivamente las cifras de 0 a 4 en orden inverso: una rueda que en el momento inicial marca 0 pasa a señalar 4 al recibir el arrastre de la rueda situada a su derecha.

Tras el desplazamiento siguiente, gira cuatro pasos de una sola vez y pasa a marcar 3 (al mismo tiempo que arrastra la rueda que está situada a su izquierda, puesto que ha pasado por 0). A continuación van apareciendo el 2, el 1 y por fin el 0. Podemos imaginar un contador en base 5/4, en el cual, en las ruedas de las unidades, las cifras se suceden de acuerdo con los giros de 4/5 de vuelta, debidos a los arrastres. Un arrastre equivale entonces a un giro de 1/5 de vuelta, lo que corresponde a la sucesión de los números en orden inverso.

Volvamos a nuestra historia de los náufragos. Se tenía un proceso de repartición con $r = 5$, $h = 1$, $s = r - h = 4$ y $a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$, pues en cada una de las cinco operaciones consideradas ha sobrado un coco. Las soluciones satisfactorias, es decir, las cantidades de cocos, son así números naturales n_0 que terminan por una combinación de 5 unos en la base 5/4:

$$n_0 \sim \ldots 11111$$

Puesto que podemos añadir delante de estos cinco unos la sucesión que se quiera, resulta evidente que existen infinitas soluciones. Ahora bien, ¿de qué manera determinar estos números o, mejor dicho, cómo expresarlos en base 10?

Tenemos una solución sencilla para nuestro problema. En un sistema de base 5/4 se cuenta a partir de 11111: después de haber añadido cuatro unidades (cuatro pasos sobre la rueda de la derecha), se produce una gran sacudida —como ocurre con un contador kilométrico normal cuando llega a marcar .... 99999— y la cifra indicada pasa a ser ... 00000. Sea n_0 un número natural tal que $n_0 \sim 11111$; $n_0 + 4$ es entonces un número que termina en cinco ceros, es decir, que tiene resto 0 en cada uno de los cinco primeros repartos. Por consiguiente, $n_0 + 4$ es divisible por $5^5 = 3125$; o, si se prefiere, es múltiplo de 3125.

Los números n_0 de cocos son, en consecuencia, los múltiplos de 3125 a los que se ha restado 4. El menor de estos números es el 3121, que en el sistema de base 5/4 se denota:

432 103 134 003 434 321 021 011 111.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LE CONGRES DES MAGICIENS A CHICAGO, IN KOPF ODER ZAHL? Martin Gardner, en *Spektrum der Wissenschaft*, Mannheim, 1978.

DIE GEFESSELTE ZEIT. JEUX, DIVERTISSEMENT ET STRATEGIES. Rüdiger Thiele. Urania, Leipzig, 1984.

LE PROBLEME DE JOSEPH. Helmut Siemon, en *Praxis Mathematik*, vol. 27, n.º 4, páginas 200-212, 1985.

LE PROBLEME DES COMPTINES ET DES DEVELOPPEMENTS SUR LES NOMBRES EN BASE FRACTIONNAIRE. Klaus Burde, en *Journal of Number Theory*, vol. 26, n.º 2, páginas 192-209, 1987.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN. Klaus Burde, en *Spektrum der Wissenschaft* (edición en lengua alemana de SCIENTIFIC AMERICAN), página 11; julio de 1994.

Libros

María José Báguena, Luis Alonso y Josep Enric Llebot

Sida

Estado de la cuestión

AIDS AND **HIV** IN PERSPECTIVE. A GUIDE TO UNDERSTANDING THE VIRUS AND ITS CONSEQUENCES, por Barry D. Schoub. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

La pertinencia de esta obra viene dada por el gran número de enfermos con el síndrome de inmunodeficiencia adquirida que se prevé para finales del siglo actual, unos cuarenta millones de personas, con un incremento de un millón de enfermos por año. Su autor, Barry D. Schoub, dirige el Instituto de Virología de la Universidad de Witwatersrand. Su intención ha sido tender un puente entre la literatura científica y los folletos divulgativos con el fin de superar la mala información, los prejuicios, la superstición y el sensacionalismo que rodean al sida.

El texto se divide en diez capítulos, precedidos de una introducción histórica en la que se describen brevemente el desarrollo de la enfermedad y el descubrimiento del virus que la origina. Analiza las manifestaciones clínicas del sida, el virus responsable del mismo, la participación del sistema inmunitario, la transmisión de la infección, las diferentes pruebas diagnósticas, los fármacos empleados en su tratamiento, los intentos de lograr una vacuna, los problemas éticos del sida y su epidemiología.

El autor rastrea el origen y evolución del sida a través de los primeros casos recogidos por informantes de la OMS en 1980 y protagonizados por homosexuales varones de Los Angeles. Un estudio retrospectivo en sueros almacenados fijó el origen de la enfermedad en Africa en la década de los cincuenta.

Los laboratorios de todo el mundo comenzaron la búsqueda del microorganismo responsable de esta entidad morbosa. Se encontró en el Instituto Pasteur, y recibió el nombre de virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), un retrovirus emparentado con el virus de la inmunodeficiencia de los simios (VIS), lo que pareció confirmar su origen africano.

Schoub revisa las manifestaciones de la enfermedad, reflejo principalmente de la acción del virus sobre el sistema inmunitario y el sistema nervioso central. Hasta la fecha, todo individuo infectado que contrae la enfermedad la mantiene y transmite hasta el fin de su vida, lo que constituye una de las principales características de esta infección.



Tras explicar los caracteres biológicos del VIH y del sistema inmunitario sobre el que actúa, intenta aclarar cómo un virus relativamente lábil y poco transmisible es capaz de producir efectos tan devastadores. Para el autor esta paradoja podrían explicarla factores como su gran variabilidad, la complejidad de su sistema regulador y su capacidad para eludir la respuesta inmunitaria del huésped.

La discusión sobre la transmisión del virus ocupa las siguientes páginas. Se detallan seguidamente las diferentes pruebas diagnósticas encaminadas a identificar la enfermedad. La "prueba del sida" tiene unas connotaciones especiales ya que un resultado positivo confirma una enfermedad mortal y señala a quien la padece como fuente permanente de infección, colocándole en un estatuto social y económicamente muy difícil de asumir.

Los múltiples esfuerzos realizados en los últimos diez años con el fin de encontrar un fármaco que lograra la curación del sida no han dado los frutos deseados. Hoy en día no es posible eliminar la infección latente del organismo infectado, por lo que se trabaja paralelamente en la obtención de una vacuna preventiva. Esta tarea plantea problemas hasta ahora insuperables derivados sobre todo de la variabilidad que presenta el VIH y de su capacidad para permanecer "invisible" ante el sistema inmunitario del huésped, al integrar su genoma en el de las células invadidas. Se presentan también problemas éticos cuando se trata de experimentar con voluntarios humanos sanos, pertenecientes a grupos de alto riesgo, quienes corren el peligro de contraer la enfermedad, por lo que se están utilizando modelos animales experimentales.

Se contemplan las implicaciones éticas y legales que acompañan a esta infección, subrayando su relación con los individuos marginados por motivos sociales o económicos. El derecho a la intimidad y la protección frente al contagio de la enfermedad pueden plantear a veces problemas de difícil solución y las nuevas medidas de control deben examinarse muy a fondo antes de llevarlas a la práctica. (M. J. B.)

Botánica

Ciencia y arte

The healing past. Pharmaceuticals in the biblical and rabbinic world. Dirigido por Irene y Walter Jacob. E. J. Brill; Leiden, 1993.

Die Ergänzung Ibn Gulguls zur *Materia medica* des Dioskurides. Edición del texto árabe con traducción al alemán comentada, por Albrecht Dietrich. Vandenhoek & Ruprecht en Göttingen; 1993.

Hortus eystettensis, the bishop's garden, and Besler's magnificent book, por Nicolas Barker. The British Library; Londres, 1994.

Luigi Baluganí's drawings of african plants. Edición preparada por Paul Hulton, F. Nigel Hepper e Ib Friis. A. A. Balkema; Rotterdam, 1991.

The art of botanical illustration, por Wilfrid Blunt y William T. Stearn. Antique Collectors Club; Woodbridge, 1994.

B-P-H/S. Botanico-periodicum-huntianum/supplementum. Compilado por Gavin D. R. Bridon, con la asistencia de Elisabeth R. Smith. Instituto Hunt de Documentación Botánica; Pittsburgh, 1991.

Medicina, dietética y botánica han ido indisolublemente unidas a la vida de los pueblos. El desconocimiento del pasado de cualquiera de las tres en un país o momento determinados implicaba, *a fortiori*, el desconocimiento de su gente. Para desentrañar tal interrelación en la vida judía de la antigüedad, se celebró hace unos años en el Jardín Botánico "Rodelf Shalom" un simposio internacional cuyas conferencias se han agavillado en *The Healing Past. Pharmaceuticals in the Biblical and Rabbinic World.* No partían, empero, de la nada. A comienzos de siglo, W. Ebstein y J. Preuss habían sentado las bases.

Entre las cumbres de la ciencia egipcia y la mesopotámica, la aportación hebrea parece un valle de irrelevancia. ¿Acaso hubo ciencia hebrea? A los autores de la Escritura les guía un compromiso religioso, prisma bajo el cual caen también la salud y la enfermedad. Pero no podemos generalizar ese enfoque a la *Mishnah* y el *Talmud*, literatura rabínica que abarca la historia de Israel desde el siglo tercero a.C. hasta el sexto d.C. Fred Rosner, al abordar la farmacia y la dietética del Antiguo Testamento y el *Talmud*, recuerda que el vacío dejado por aquél en lo referente a la aplicación médica de las plantas, lo ocupa éste. Rosner rastrea drogas y dietética (con un apartado fascinante sobre la llamada penicilina judía, la sopa de pollo).

Dos productos vegetales gozaron de especial predicamento, el bálsamo de Gilead y la mandrágora. Gilead se halla en el curso medio del Jordán. Tierra de pastos, era famosa por sus especias; producía también un bálsamo muy apreciado. Se disputa si se trata de una goma o exudado del árbol de la trementina, una mirra (*Commiphora meccanensis*), una hierba olorosa (*Dracocephalum canariense*), el bálsamo de Jericó o un bálsamo extraído de *Balsamodendron gileadense*. El bálsamo del que Dioscórides dice que crece en Judea y en Egipto es *Balsamodendron oppobalsamum.* Por su lado, la mandrágora, planta genuina de la cuenca mediterránea, se convirtió en objeto de múltiples supersticiones, a la que se atribuían propiedades afrodisíacas.

Walter Jacob, en su estudio sobre las plantas véterotestamentarias comercializadas en Palestina, parte de la hipótesis según la cual los judíos conocían la praxis medicinal mesopotámica. A su imagen, *Talmud* y *Mishna* reflejan la medicina hallada en los registros helenísticos. Hasta veintiuna de las plantas bíblicas hallaron aplicación terapéutica en Egipto y Asiria; por consiguiente, también debieron de tenerlo, en Israel, donde eran nativas: algarrobo, ricino, casia, corona de espinas, comino, ciprés, higuera, lino, árbol del incienso, puerro, ajo, cebolla, sabina, granado, adormidera, acoro, sicómoro, tamarisco, maná (*Tamarix orientalis*) y lirio de agua.

La Biblia menciona otras plantas que tenían uso médico en Asiria: áloe, pino carrasco, anémona, laurel, neguilla, cedro, camomilla, cólquico de otoño, ranúnculo, palmera datilera, cidro, mandrágora, menta, mirto, ortiga, encina, oleandro, álamo blanco, azafrán y ballico. La farmacopea israelita incluía, además, la escanda, almendro, bálsamo, cebada, carrizo, crisantemo, eneldo, caña común, loto, calabacín, papiro, juncia, terebinto, tomillo, vid y sauce.

La relación entre el Egipto faraónico, y la patria de Abraham fue intensa. Si atendemos a las plantas identificadas en los textos y añadimos las recuperadas de las excavaciones, observaremos una notable correlación. En los jardines egipcios se cultivaban el comino, coriandro, eneldo, neguilla y mastuerzo, de origen palestino. Estas especies comparten la característica común de un alto contenido esencial en sus semillas y hojas. Los mercaderes del faraón no habrían importado plantas desconocidas o productos vegetales sin tener la certeza de sus propiedades farmacéuticas.

Más ceñido, no menos ejemplar, es el trabajo de Irene Jacob en torno al ricino, "árbol milagroso a través de cuatro mil años", y que ella misma cultiva para avalar la descripción de su naturaleza y propiedades. En el papiro de Ebers (1550 a.C.) el ricino entra en numerosas recetas y aparece en la Biblia como el remedio soberano.

Sabían los antiguos cuán importantes eran las condiciones ambientales para las plantas sanadoras. De la bonanza del clima palestino se hace eco Samuel Kottek al abordar la botánica de Joseph ben Matityahu, Flavio Josefo, que nació el mismo año en que Calígula subió al trono. Además de los habituales opobálsamo, ciprés, mirobálanos, mirra, terebinto, amomo, fenogreco y la inevitable mandrágora, Josefo cita algunas plantas con especial significación: el cinamomo para la unción sacerdotal, la sideritis para la mitra del sumo sacerdote y la ruda para los exorcismos.

Stephen Newmyer se adentra en uno de los más enigmáticos de los escritores antiguos, Asaf el judío, autor del *Libro de los remedios*, una adaptación de Dioscórides. Puesto que las 123 plantas de Asaf constituyen sólo una pequeña muestra del millar largo descritas por Dioscórides, tal selección podría reflejar los problemas sanitarios específicos de sus lectores. John Riddle señala que "antiguos y medievales debían de ser especialmente vulnerables a las mordeduras de serpientes, escorpiones, perros rabiosos y víboras." Treinta y una de las 123 plantas de Asaf se dice que son antídotos contra el veneno de escorpión y serpiente.

De la influencia de Dioscórides en la farmacia judía a su peso en la botica árabe: *Die Ergänzung Ibn Gulguls zur Materia medica des Dioskurides.* Albert Dietrich añade, a su ya extensa bibliografía sobre la tradición dioscorídea en la cultura medieval, una nueva edición crítica. Abu Dawud Sulayman ibn Hassan, Ibn Yulyul, nació en Córdoba en el año 944 y murió hacia el 994. Desarrolló, pues, su actividad en la época de esplendor del califato Omeya de Córdoba. De amplia formación, conoce bien los autores latinos. (El lector

español encontrará una buena introducción a su obra en los trabajos publicados por la escuela andaluza que dirige Expiración García, en particular en los de Ildefonso Garijo.)

En Bagdad había aparecido en el siglo VIII la primera versión al árabe de Dioscórides. No resultaba entonces una tarea fácil encontrar el sinónimo adecuado para el nombre del remedio vegetal griego, por lo que en muchísimas ocasiones los traductores se limitaron a transcribir en grafía árabe la denominación original. Y a esa tarea de identificación necesaria se dedicó Ibn Yulyul en su *Libro de la explicación de los nombres de los medicamentos simples tomados del libro de Dioscórides.* Pero, entendiendo la medicina en su sentido amplio, no se detiene en esa primera labor, sino que se apresta a completarla con lo que "se emplea en el arte de la medicina y es útil a ésta, que Dioscórides omitió", y eso es lo que Dietrich ofrece.

Se hilvanan 62 remedios, donde se consigna el nombre, sinonimias y lugar de procedencia, y se describen la morfología, constitución galénica, posología y eficacia terapéutica. Como botón de muestra, "haligag asfar", la primera que menciona, es india. Igual que los otros dos mirobálanos siguientes, se trata, posiblemente, del fruto de *Terminalia chebula*, originaria del archipiélago malayo. Indias, es decir, meso y extremo-orientales, son la mayoría de las plantas no referidas por Dioscórides. Algunas gozarían de gran aprecio, como ciertas palmas, el amaranto o el alcanfor. De ahí el interés de la compilación de Ibn Yulyul para conocer la fundamentación de los herbarios medievales donde estas nuevas especies aparecen incorporadas.

La historia de la botánica se asienta sobre dos pilares: los textos y el dibujo, herramienta ésta muchas veces indispensable para entender el galimatías verbal. Cuarenta y cinco años han transcurrido desde la primera edición de *The Art of Botanical Illustration*, de Wilfrid Jasper Blunt (1901-1987), que acaba de troquelar en espléndida joya el Antique CollectorsClub con la asistencia técnica del Jardín Botánico de Kew. Se han sustituido las escuálidas reproducciones de posguerra con una iconografía lujosa de singular valor botánico e histórico. Se han agregado algunos hallazgos notables. Por ejemplo, los dibujos de la expedición novohispana de Sessé y Mociño, que aparecieron en Barcelona y se encuentran ahora para sonrojo nacional en el Instituto Hunt, los dibujos originales del gran herbario de Fuchs, o los de Camerarius el Joven. William T. Stearn ha actualizado el texto, convirtiendo su asesoría técnica de la primera edición en coauto en ésta.

Aunque parece inverosímil que las descripciones de Teofrasto se acompañaran de dibujos de referencia, sí sabemos, por testimonio de Plinio el Viejo, que en el siglo I a.C corrían ya los herbarios ilustrados de Cratevas, Dionisio y Metrodoro. Sin datos sólidos en que apoyar las primeras representaciones de la *Materia medica* de Dioscórides, hay que esperar hasta el siglo VI para encontrar un magnífico testimonio. Nos referimos al *Codex Vindobonensis*, propiedad de Julia Anicia, hija del emperador de Oriente. Este manuscrito, que data del año 512, alcanza un grado de perfección en la ilustración de las plantas no superado en mil años. (A través de los cristianos nestorianos, el original griego de Dioscórides se trasladó al siríaco y al árabe.)

El herbario latino más influyente fue el de Apuleyo Bárbaro. Se trata de una compilación irrelevante de recetas médicas entecas y cosidas en torno al 400. La *Materia medica* de Dioscórides se tradujo al latín durante la primera mitad del siglo VI. Esas dos obras junto con el tratado pseudodioscorídeo *De herbis feminis* constituyeron el cuerpo principal de conocimiento botánico y farmacológico de la Edad Media.

En el siglo XIV los pintores toscanos evidencian un amor nuevo por la naturaleza, pero apenas si nos dejan una flor cuyo género sea reconocible. Tan sólo el lirio blanco se dibuja con trazos realistas. Cuando éstos llegan, un siglo más tarde, se refugian en las miniaturas de *Los libros de horas* y los *Tacuina sanitatis.* Una auténtica revolución supone la acuarela de 1503 de A. Durero: "Das grosse Rasenstück", estampa fiel de ecosistema, que retrata asociaciones centroeuropeas. En ese cuadro famosísimo el botánico discierne *Poa pratensis, Veronica chamaedrys, Taraxacum officinale, Cynoglossum officinale, Dactylis glomerata, Bellis perennis, Plantago major, Agrostis stolonifera* y *Achillea millefolium.*

El arte del grabado en madera se había extendido por Europa desde comienzos del XV. Con esta técnica se imprimen los grandes herbarios occidentales: *Herbarius Latinus, Herbarius Germanicus* y *Grete Herball.* Y las primeras floras centroeuropeas, desde los fundacionales *Herbarum Vivae Eicones* de Otto Brunfels con ilustraciones de Hans Weiditz. El eléboro y la pulsatila nos confirman que se ha abandonado para siempre la estilización. No tardará en superarlo el *De Historia Stirpium* de Leonhart Fuchs, fusilado, lo mismo que otros, más allá de toda consideración. Aconseja Fuchs en el prólogo que las plantas se dibujen enteras, es decir, con sus raíces, tallos, hojas, flores, semillas y frutos. De ahí que a veces, por razones de economía, aparezcan en el mismo pie flor y fruto, e incluso flores de diversas variedades.

Algunas ilustraciones del *Herbarius Latinus* pasarían a los *Commentarii in sex libros Pedacii Dioscoridis,* de Pierandrea Mattioli, obra que influiría de una forma determinante en Andrés Laguna. En los tratados renacentistas empiezan a entrar las nuevas plantas, de ambas Indias. Monardes, por ejemplo, aporta la imagen del tabaco. Los dibujantes son ahora inseparables de los naturalistas. Los contratan las grandes casas editoras; Plantin se hace con los servicios de Pier van der Bocht. Llueven los patronazgos, como el de Felipe II sobre Pomar, cabalmente estudiado por López Piñero. Los viajeros aguzan la vista para captar los caracteres distintivos en una flora creciente, como Clusius en su deambular por Europa entera, con provechosa posada en España. Los jardines emprenden cruces y cultivan variedades selectas. Del jacinto oriental traído de Constantinopla en años finiseculares menciona ya 69 Caspar Bauhin.

Al grabado en madera le sustituyen las planchas metálicas. Con la nueva técnica se imprime ya el *Phytobasanos* de Fabio Colonna y, muy pronto, las láminas de Pierre Richer de Bellval, del jardín botánico de Montpellier A lo largo del XVII, mientras Inglaterra rinde los mejores frutos en sistemática, es en el continente donde brota el mejor plantel de ilustradores. En Francia, Daniel Rabel y Nicolas Robert pintan para la nobleza acuarelas que despiertan la curiosidad de los botánicos, en este caso de Antoine de Jussieu. Las colonias holandesas actúan de acicate para los más decididos. El Principe Mauricio de Nassau viaja a Brasil en 1636 acompañado de una pléyade de científicos que fundaron la ciudad ahora dedicada a S. Antonio y crea un jardín zoológico y botánico: resultado, siete espléndidos volúmenes ilustrados de historia natural realizados por Albert van der Eckhaout, Zacarias Wagner y otros.

Los trabajos botánicos de Georg Eberhard Rumphius, en el atardecer del XVII, fueron ilustrados por Hogeboom, Philip van Eyck y de Ruyter.



Tulipanes del Hortus Eystettensis

Las pinturas de Maria Merian ponen de moda las piñas, manihot, vainilla, papaya, jacinto de agua y otras plantas tropicales. Jacobus van Huysum pintó la *Historia plantarum rariorum* de John Martyn. Entre los muchos libros ilustrados entre 1680 y 1740 no debemos omitir los de Robert Morison (*Plantarum Historia Universalis Oxoniensis*), Johan Jakob Dillenius (*Hortus Elthamensis*) y Elizabeth Blackwell (*A Curious Herbal*) en Inglaterra; los de Adriaan van Rheede tot Draakestein (*Hortus Indicus Malabaricus*) y Commelin (*Horti Medici Amstelodamensis Rariorum Plantarum Descriptio et Icones*) en Holanda; los de Johann Christoph Volckamer (*Nürnbergische Hesperides*) y Johann Weinmann (*Phytanthoza Iconographia*) en Alemania; ni el de Jakob Breyne (*Exoticarum centuria prima*) en Danzig.

El genio del Georg Dionysius Ehret dominó el arte botánico durante los años centrales del siglo XVIII. Viajó por Europa estudiando todos los jardines, hasta recalar en Inglaterra con Hans Sloane y Philip Miller, pintando láminas que se rifaron personalidades y jardines. Su obra grabada principal está en *Plantae et Papiliones Rariores* y en las *Plantae Selectae* y *Hortus... Amoenissimorum Florum*. En Francia las nobles tradiciones del Real Jardín persistió con Madeleine Basseporte, quien había sucedido a su maestro Aubriet como retratista del rey, de su gabinete y del Jardín del Rey. Por la impronta que dejaron en los botánicos españoles, aparte de su obvio valor intrínseco, recordaremos a dos autríacos, Nikolaus von Jacquin (*Selectarum Stirpium Americanarum Historia*) y Joseph Plenck (*Icones Plantarum Medicinalium*). Período de gloria que puede cerrarse con Pierre Joseph Redouté y sus antológicas *Les Roses*, *Plantes Grasses*, *Les Liliacées*, la *Botanique de J. J. Rousseau*.

Sacrificando bastantes, recordaremos del XIX a dos británicos de origen alemán, Francis y Ferdinand Bauer, y una revista, *Botanical Magazine*, fundada en 1787, que prosiguió publicándose sin interrupción hasta 1983. Ferdinand pintó la *Flora Graeca*, *Illustrationes Florae Novae Hollandiae*, *A Description of the Genus Pinus*. Walter Hood Fitch representa la edad de la litografía: *A Century of Orchidaceous Plants*, *A Second Century of Orchidaceous Plants*. El paso ulterior, la fotografía, con todas sus posibilidades.

Si queremos sorprender de esa pincelada presurosa dos instantáneas, una representativa del siglo XVII y otra del XVIII, seleccionaremos sin miedo a equivocarnos el *Hortus Eystettensis* y los dibujos de las plantas etíopes de Luigi Balugani. El primero lo acaba de editar Nicolas Barker, su más tenaz estudioso. "Hortus Eystettensis" era el nombre de un jardín que rodeaba un castillo levantado sobre una roca, el palacio de Johann Conrad von Gemmingen, obispo de Eichstätt. Un río separaba el vergel de la ciudad, a mitad de camino entre Nuremberg y Munich. Era también el nombre de un magnífico libro ilustrado y grabado en cobre, sacado adelante con el empeño de Basilius Besler.

El 17 de mayo de 1611, Philipp Hainhofer visitó el jardín episcopal. Tenía él entonces 32 años y el obispo entre 50 y 51, aunque ya enfermo de muerte. Cuenta en su diario que paseó por una sucesión de jardines, en cada uno de los cuales florecían plantas de un país diferente. Le llamó la atención la colección de rosas, lirios y tulipanes. Los jardines estaban adornados con muros ilustrados y glorietas de descanso, en una de las cuales había una mesa de ébano. En el tajo del despeñadero se observaban fósiles de peces, aves, flores y hojas.

Pero, ¿quién estaba detrás de lo que a primera vista puede parecer un capricho de obispo palatino? Directamente, el botánico de Nuremberg Joachim Camerarius el Joven. Se advierte una tangible continuidad en la denominación de las plantas del *Hortus medicus et philosophicus* de Camerarius y el *Hortus Eystettensis*. A través de Camerarius, y sin mediación alguna a la muerte de éste, interviene Clusius. En el frontispicio del *Hortus Eystettensis* hay dos plantas americanas: un nopal y un "áloe americana". Se pretendió que el texto recogiera los avances aportados por Rembert Dodoens, Mattioli, Caspar Bauhin, Clusius y Matthias Lobelius, el propio Camerarius y, por supuesto de Leonhart Rauwolff, amén de las obras más recientes como el *Stirpium et fossilium Silesiae Catalogus* (1600) y el *Hortulus sanitatis* de Castore Durante. Según todos los indicios, Besler contó para ello con la ayuda del sobrino de Camerarius, Ludwig Jungermann. Por lo que respecta a las ilustraciones se incorporaron, además, plantas novísimas.

Luigi Balugani's Drawings of African Plants destaca del telón de fondo de los viajes científicos que caracterizan el siglo XVIII, centuria marcada por una inquietud ilimitada por todos los aspectos de la cultura: arqueología, historia, etnografía, geografía, flora y fauna. En este caso se trata de la expedición de James Bruce de Kinnaird a las fuentes del Nilo. Mientras James Bruce exploraba el mar Rojo y Etiopía, James Cook ponía el *Endeavour* rumbo al Pacífico Sur. No parecía que las dos expediciones tuvieran muchas semejanzas. La empresa de Cook estuvo muy bien preparada, acometida por profesionales bajo la responsabilidad del Almirantazgo y la Regia Sociedad; Joseph Banks había habilitado el barco para sus exigencias científicas, con el auxilio de otros dos naturalistas y dos artistas. Por contra, la expedición de Bruce fue una aventura privada, sin logística gubernamental o institucional y financiada por su propio bolsillo. Bruce se rodeó de un solo auxiliar, Luigi Balugani, joven arquitecto. Bruce empezó por descubrir y registrar yacimientos arqueológicos griegos y latinos del norte de Africa. Terminada esta primera labor, se encaminó hacia Etiopía. Balugani, a su lado, dibujó la vida zoológica y botánica.

Pero si nos fijamos en las rutinas esenciales, las dos expediciones eran muy parecidas. Bruce calculaba su posición por observación instrumental, cualquiera que fueran las condiciones, y levantaba mapas, lo mismo que Cook. Igual que éste, Bruce registraba la temperatura, lecturas barométricas, vientos y otras condiciones.

Pese a la displicencia que Bruce manifiesta para con los reinos de la península Ibérica, en su viaje por Europa, la verdad es que su fuente de información principal son los relatos de los clérigos Francisco Alvarez y, sobre todo, Jerónimo Cobo. Algo parecido ocurrió con los bocetos y las acuarelas de las plantas. Bruce se arrogó en *Travels* la autoría de los dibujos de las plantas abisinias. Tal era la perfección lograda por Balugani, que las ponía por encima de ejemplares de herbario. Aunque Balugani atinó la mayoría de las veces en la notación de órganos, no era un profesional capaz de distinguir la novedad de una especie. Intuyó sin embargo la importancia de un tipo particular de inflorescencia, el monocasio, no representado hasta entonces. Las semillas, bulbos y raíces traídos de Etiopía se cultivaron en distintos jardines: en el de Trianon de París por André Thouin, que una vez crecidas identificó Jacquin, en los de de Florencia y en el de Kew.

Dé un salto el lector. ¿En qué ha germinado esta atención secular prestada a la ciencia de las plantas y a su arte? *B-P-H/S. Botanico-Periodicum-Huntianum/Supplementum* complementa y revisa el catálogo de publicaciones periódicas relacionadas con

la botánica que el Instituto Hunt publicó en 1968. Lo mismo que la obra base no está destinada al público en general, sino a las instituciones, donde presta gran ayuda para cualquier proyecto de investigación que se quiera acometer. De un grueso elenco de 12.000 títulos de partida se pasó a más de 25.000 en 1991, un río cuyo cauce crece por días. Cierto es que abarca disciplinas botánicas en sentido muy amplio, con la inclusión de revistas y boletines de agricultura y silvicultura, amén de las obligadas fisiología y genética vegetal, microbiología y ecología. Lo es también que algunas nuevas disciplinas han entrado con especial fuerza, como la paleobotánica y biotecnología vegetal, que han ensanchado el elenco. Complicación que trae, como contrapartida, una mayor garantía de exhaustividad, que de eso se trata.

Las entradas siguen el orden alfabético. Se da el título completo de la publicación. ¿Cuántas veces hemos pedido a la bibliotecaria de turno información sobre determinado artículo aparecido en una obscura revista de la que sólo conocemos las abreviaturas mal pergeñadas con la consiguiente pérdida de tiempo y, en la mayoría de las ocasiones, nulo éxito? A ello se añade las obligadas referencias cruzadas que facilitan la labor de quien está preparando una tesina, la tesis de doctorado o un trabajo de investigación.

Para llevar a cabo una obra de tanto empeño se han tenido que vaciar muchos catálogos, demandar la ayuda de centros de documentación científica, bibliotecas y publicaciones especializadas. Si a ello añadimos apéndices orientativos y la transliteración de lenguajes cirílicos y otros, tendremos una obra magistral de documentación científica que sirve de modelo para otras disciplinas. (L. A.)

Física española

Termodinámica irreversible

EXTENDED IRREVERSIBLE THERMODYNAMICS, por David Jou, J. Casas-Vázquez y G. Lebon. Springer Verlag; Berlín, 1993.

Al poco de salir, tuve la satisfacción de ver este libro en las librerías universitarias de Washington, Ann Arbor, Cambridge y San Francisco. Esta mera comprobación, por sí sola, constituye ya un indicio sólido de que nos hallamos ante un texto de alto nivel, en una disciplina en que no abundan las obras en inglés de autores españoles.

En los últimos veinte años, la termodinámica de procesos irreversibles ha visto desarrollarse una nueva teoría que se propone ir más allá de la hipótesis del equilibrio local, pieza básica de la teoría clásica de la termodinámica de no equilibrio. La nueva teoría, conocida como termodinámica extendida ("Extended Irreversible Thermodynamics"), sirve de terreno común para la síntesis de las dos principales teorías que le precedieron, la teoría clásica de la termodinámica de procesos irreversibles (a la que van asociados los nombres de Onsager, Prigogine, Meixner, De Groot y Mazur) y la termodinámica racional (desarrollada por Coleman, Truesdell y Noll). Pese a sus éxitos en campos diversos, estas dos teorías habían entrado en un conflicto de incompatibilidad. La nueva teoría generaliza las dos en una síntesis superior.

La termodinámica extendida, que empieza a apuntar sin una estructura termodinámica completa en ciertos trabajos de R. E. Nettleton y de I. Müller, no cobra cuerpo hasta finales de los setenta, cuando se redescubrieron y reformularon las ideas básicas. Destacan en esta empresa los trabajos de los grupos de las universidades de Barcelona (Autónoma), Lieja, México, Berlín, Bolonia, Montreal, Budapest, Johannesburgo. En concreto, un artículo de revisión general de los autores del libro que comentamos, artículo de obligada referencia desde su aparición en 1988, fue el primer intento de organizar en un marco teórico unitario y coherente los resultados principales de las diversas líneas de investigación.

En esencia, los ingredientes característicos de la termodinámica extendida son los siguientes: 1) inclusión de los flujos disipativos (flujo de calor, de difusión, presión viscosa) entre las variables independientes del sistema; 2) definición de una entropía de no equilibrio que, a diferencia de la entropía de equilibrio local, depende también de los flujos disipativos, y 3) utilización de métodos termodinámicos para definir las restricciones que deben satisfacer las ecuaciones de evolución de los flujos disipativos.

Este desarrollo tuvo como motivación inicial el estudio de procesos rápidos, cuya escala temporal sea del orden del tiempo de relajación de los flujos disipativos, o la paradoja de una velocidad de propagación infinita para los pulsos térmicos en el marco de la teoría clásica.

La primera parte del libro, dedicada a los aspectos generales de la teoría, consta de dos capítulos. Ofrece el primero una presentación sucinta de las dos teorías principales de la termodinámica de no equilibrio: la teoría clásica y la racional. El capítulo segundo desarrolla los principios de la termodinámica extendida e indica cómo, al ampliar el dominio de las dos teorías anteriores, las hace confluir en muchos aspectos. La segunda parte aborda la fundamentación microscópica desde perspectivas muy diversas: teoría cinética de los gases, teoría de fluctuaciones, teoría de la información y formalismo de operadores de proyección.

En la tercera parte del libro, cabe destacar la diversidad de las aplicaciones: teorías hiperbólicas del transporte del calor (es decir, transporte con velocidad finita, a diferencia de la propagación instantánea de la teoría clásica), reología, hidrodinámica generalizada, difusión no fickiana, diagramas de fase en presencia de flujos y fluctuaciones eléctricas en estados estacionarios fuera de equilibrio, con un capítulo dedicado a la formulación relativista de la teoría y a algunas de sus aplicaciones a la cosmología.

La bibliografía, muy amplia, deja constancia de los resultados de los diversos grupos que trabajan en este campo, a los cuales se hace frecuente referencia. (J. E. Ll.)



Lars Onsager (1903-1976)

Apuntes

Luz sobre agujero negro

Los astrofísicos celebran un año fecundo de éxitos con el descubrimiento de una línea de emisión distorsionada, hallada en el espectro de rayos X de una galaxia de Seyfert. ¿Tanto valor encierra? Se admite que la energía que mueve a los cuásares o núcleos galácticos activos procede de la acreción de gas en el agujero negro alojado en el centro de la galaxia huésped. Pero, ¿cómo saber que existe realmente allí un agujero negro? A falta de pruebas directas se recurre, como en tantos casos, a caminos inferenciales: conforme un gas de acreción se acercara al horizonte de sucesos, debería adquirir una velocidad cercana a la de la luz, y los efectos relativistas y gravitatorios resultantes nos servirían para vincularlos a la presencia de un agujero negro. Esa es la prueba obtenida en la radiación de la galaxia MCG-6-30-15.

Nubes que el viento lleva

Durante el viaje de aproximación que en 1989 realizó la sonda *Voyager 2* cabe el planeta Neptuno, descubrió una gran mancha obscura en su hemisferio meridional. Esa tormenta atmosférica sugirió un inmediato paralelismo con la roja gigante de Júpiter, contemplada desde hace cientos de años. Pero tal estabilidad no parece predicarse de la atmósfera de Neptuno: el *Telescopio Hubble* ha observado que la nube del sur se había desvanecido y, en cambio, se había formado otra tormenta en el hemisferio septentrional.

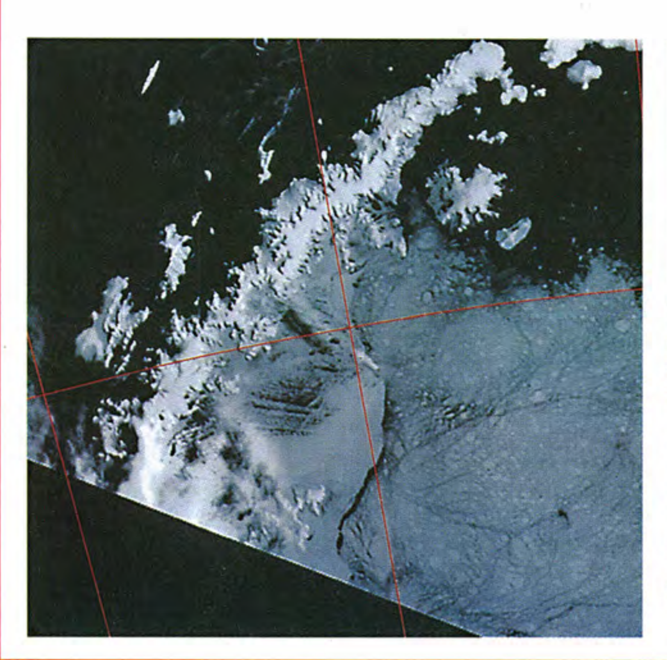
Cielos psicodélicos

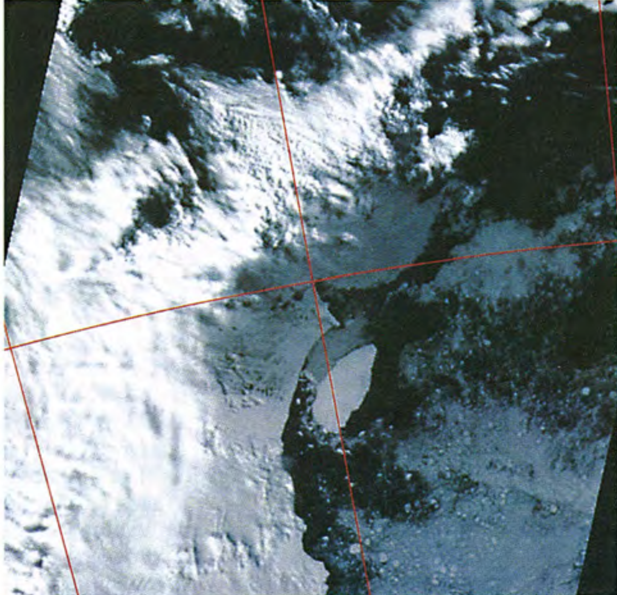
Las fulguraciones solares de rayos X de intensidad moderada se producen en escalas temporales de un día a una semana. Se han visto fulguraciones mucho más intensas procedentes de otras estrellas. El satélite japonés ASCA, de una sensibilidad sin precedentes, ha detectado varias fulguraciones de intensidad solar en Proxima Centauri, una estrella enana, muchísimo más débil que el Sol. Todo apunta a que tales destellos constituyen un fenómeno habitual en el firmamento.

Se derrite

La Antártida está calentándose. Lo dicen los hielos, que empiezan a derretirse. La imagen obtenida por satélite en el mes de enero (*izquierda*) muestra el aspecto de tela de araña que presenta la isla de James Ross, rodeada de agua (*arriba a la derecha*): desde los primeros mapas realizados hace 100 años, ha permanecido unida a la península Antártica por un banco de hielo. La imagen recoge también la península, compuesta por una cadena de montañas (*de abajo arriba, en diagonal*), rodeada por unas manchas oscuras de mar; la gran plataforma de hielo de Larsen aparece abajo a la izquierda. Otra imagen de satélite (*derecha*), tomada en febrero, aporta datos sobre nuevos cambios. La plataforma de hielo ha retrocedido, se ha desgajado un enorme iceberg y ha desaparecido la parte más septentrional de la plataforma, creando un penacho de detritus de hielo.

TIM BEARDSLEY





Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ASTEROIDES Y COMETAS COMO AMENAZA PARA LA TIERRA, por Andrea Carusi

Estos cuerpos celestes pasan muchas veces relativamente cerca de nosotros sin que constituyan ningún peligro. La humanidad se prepara, sin embargo, para someterlos a estrecha vigilancia.

LAS CUEVAS PALEOLITICAS DE FRANCIA, por Jean Clottes

La cueva de Chauvet, recién descubierta, es un yacimiento clave del arte paleolítico. Durante 25.000 años los habitantes de Europa expresaron su cultura pintando y grabando en las paredes de las cuevas.

EL TRABUCO, por Paul E. Chevedden, Les Eigenbrod, Vernard Foley y Werner Soedel

Fue el arma más poderosa de su tiempo. Modernas reconstrucciones y simulaciones informáticas ayudan a comprender mejor su funcionamiento.

TRATAMIENTO DE LA DIABETES CON CELULAS TRASPLANTADAS, por Paul E. Lacy

La implantación de células de los islotes del páncreas cura muchos casos de diabetes. Cuando se logre evitar el ataque del sistema inmunitario contra los injertos, se generalizará su uso.

LA LUZ DE LOS FONDOS MARINOS, por Bruce H. Robison

Bajo la superficie de los mares la luz solar se extingue poco a poco. En la oscuridad resultante vive una multitud de animales bioluminiscentes.

PLASTICOS CONDUCTORES, por Philip Yam

Ajustando las propiedades eléctricas de los polímeros conductores, los investigadores confían en lograr una electrónica un poco más orgánica.

LOS DIAGRAMAS DE LYAPUNOV, por Mario Markus

Todo comenzó tratando de comprender el comportamiento de la levadura de cerveza. Y acabó en unos gráficos apreciados en los círculos científicos y artísticos.

J. ROBERT OPPENHEIMER, por John S. Rigden

A Oppenheimer se le recuerda sobre todo por la influencia que tuvo durante la segunda guerra mundial; pero en los años treinta hizo muchas contribuciones importantes a la física teórica.

LA GENETICA DE LOS CHUETAS MALLORQUINES, por Misericordia Ramón, Antonia Picornell y José A. Castro

El aislamiento de los chuetas con respecto a la población mallorquina ha mantenido algunas características genéticas judías originarias. La elevada incidencia de la fiebre mediterránea familiar puede ser un ejemplo de ello.

